

**Análisis del Ciclo de Vida de edificios residenciales**  
**Propuesta metodológica para el diseño de una herramienta simplificada**

*Life cycle assessment of dwellings. Methodological proposal of a simplified tool*

---

**TESIS DOCTORAL**

---

*Bernardette Soust-Verdaguer*

---

Directores  
Carmen Llatas · Antonio García Martínez



**2017**

Departamento de Construcciones Arquitectónicas I  
Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Sevilla

**Universidad de Sevilla**



# **Análisis del Ciclo de Vida de edificios residenciales**

## **Propuesta metodológica para el diseño de una herramienta simplificada**

*Life cycle assessment of dwellings. Methodological proposal of a simplified tool*

---

**TESIS DOCTORAL**

---

*Bernardette Soust-Verdaguer*

---

Directores  
Carmen Llatas · Antonio García Martínez

## Agradecimientos

---

Esta Tesis es el resultado de un camino que he emprendido desde hace ya varios años, y que ha marcado en gran medida el desarrollo de mi vida profesional y personal. Mi compromiso con mejorar la calidad ambiental de los edificios, se remonta a más de 12 años atrás, durante las fases finales de mi formación en arquitectura en la Facultad de Arquitectura de la Udelar (Uruguay), y fue encauzado gracias al aporte de diversos profesores que me facilitaron la andadura. A partir del acercamiento al mundo académico y concretamente al Instituto de la Construcción (IC) de la Facultad de Arquitectura, fue donde encontré el apoyo y la motivación para incorporarme a la investigación en arquitectura en este campo. Gracias a la ayuda allí recibida, así como a la beca de estudios otorgada por esa Facultad de Arquitectura, puede dar el salto de completar mi formación en el ámbito de la sostenibilidad en arquitectura en otros centros de formación. En la Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Marseille, Francia, pude desarrollar diversos cursos vinculados a esta temática, así como también logré establecer contacto con el ámbito profesional, a través de la pasantía en el estudio DoMeNe, Salon de Provence, Francia. Años más tarde tras la culminación de mis estudios de grado en arquitectura en la Facultad de Arquitectura de la Udelar y a través del programa de movilidad entre Universidades Latinoamericanas y Andaluzas de la AUIP, y la Oficina de Cooperación de la Universidad de Sevilla, logré acceder a los estudios de posgrado en el Master en Ciudad y Arquitectura Sostenibles. Mi andadura por tierras andaluzas también me permitió conocer más en profundidad la práctica profesional en este contexto. Varios han sido los equipos y estudios profesionales que me han abierto sus puertas, de los cuales he cosechado muchos amigos y compañeros que me han aportado muchos aprendizajes, animado y brindado confianza para seguir adelante. El más significativo y longevo de ellos, sin dudas ha sido mi paso por MedioMundo arquitectos, realizado en su totalidad en paralelo al desarrollo de esta tesis, el cual me permitió explotar al máximo las potencialidades del uso del BIM en el diseño arquitectónico.

A lo largo de este largo camino, agradezco enormemente a todos los que de alguna manera u otra han aportado en ayudarme a transitarlo. A Duilio por haberme apoyando y animado desde los inicios del camino. A mis compañeros del IC por el cariño y la generosidad que siempre me han brindado. A todos los amigos y compañeros de acá y de allá, (Uruguay, Francia, España) los que me apoyaron, animaron y ayudaron a seguir.

A todos los que colaboraron en brindarme datos e información para llevar adelante la aplicación de la metodología. A Cristina Fynn y Cristina Cardozo de la ANV, Federico Rodríguez de Campligia Construcciones, Laura Moya de la Universidad ORT, Uruguay e Ignacio de Souza de la Udelar por haberme brindado la información y recaudos gráficos sobre los casos de estudio. A Leonardo Lescano de Retak, por la disposición e inmediata respuesta. Agradezco también a los que me han brindado la posibilidad de hacer este trabajo en la Universidad de Sevilla, como forma de difundir y dar a conocer nuestro paísito.



A mis directores de tesis, también compañeros de camino, por todo el ánimo, la ayuda y la confianza que han depositado en mí durante este proceso. También a Juan Carlos Gómez de Cózar por el apoyo y enriquecedores aportes brindados en las fases finales de este proceso, por haberme invitado a participar como ponente en el I Seminario LCA|BIM desarrollado en la ETSA Sevilla, celebrado en mayo de 2017. A Miguel Ángel Campano por su tiempo. A Kate y Claire por su ayuda en las correcciones de los textos en inglés. A Silvia, parte fundamental en el camino de la defensa de esta Tesis.

A Alexander Passer, a los organizadores y participantes del IEA EBC ANNEX 72, por brindarme la oportunidad de participar durante la fase final de esta Tesis, en el desarrollo de la reunión preparatoria del proyecto desarrollada los días 18-19 de mayo de 2017 en Copenhague. Esto nos permitirá también poder colaborar en este proyecto que durará hasta el año 2021, que incluye la participación de más de 20 países y busca promover el uso del ACV en edificios desde los procesos de diseño y toma de decisiones.

A la familia uruguaya y la familia andaluza por estar ahí siempre. A Jose por no dejarme bajar los brazos.

## Resumen

---

El desarrollo de métodos y herramientas para la evaluación ambiental de edificios ha crecido significativamente durante los últimos años. El Análisis del Ciclo de Vida (ACV) constituye una de las herramientas de evaluación cuantitativa más completas y complejas hacia la optimización ambiental de los edificios. En la serie de normas ISO 14040 e ISO 14044, se describe el marco metodológico del ACV y en las normas EN 15978 y EN 15804, se detalla el marco metodológico que orienta su aplicación en edificios, a los efectos de asegurar condiciones de transparencia y fiabilidad.

La literatura de referencia reconoce la complejidad y dificultad de la aplicación del ACV en edificios, principalmente durante la fase de recopilación de datos. En este sentido, varios estudios demuestran que la integración de herramientas BIM (Building Information Modeling) al ACV puede facilitar la obtención y manejo de datos, así como también posibilitar la retroalimentación de ambas herramientas.

El objetivo de este trabajo es el diseño de una herramienta simplificada de evaluación basada en el ACV, que permita evaluar de forma cuantitativa los impactos ambientales generados por edificios residenciales durante su ciclo de vida, como forma de orientar la toma de decisiones. En este sentido, se asume como punto de partida la integración de modelos BIM en la aplicación del ACV.

Dentro del contexto de Uruguay, la inexistencia de herramientas de evaluación de tipo cuantitativo, genera oportunidades para su desarrollo y verificación. De modo que se abordarán comparativamente diferentes soluciones constructivas y distribuciones funcionales de la tipología edificatoria más frecuente desarrollada en este contexto: la vivienda unifamiliar. A través del caso 1, se evalúa comparativamente la utilidad de la herramienta para obtener los impactos ambientales que produce un sistema que compone el edificio y a través del caso 2 se evalúan comparativamente tres soluciones de viviendas unifamiliares diferentes.

La discusión de los resultados, además de analizar el alcance y limitaciones de la herramienta desarrollada, aborda recomendaciones y desafíos que se abren de cara a la integración BIM-ACV. Las conclusiones sobre el trabajo demuestran que la herramienta es capaz de aportar datos sobre los impactos producidos en el ambiente, expresados de forma clara y efectiva para orientar la toma de decisiones, ayudando a evaluar diferentes soluciones constructivas y visibilizar los impactos que producen las mismas desde la fase de proyecto.

## Abstract

---

*The development of methods and tools for the environmental assessment of buildings has grown significantly over the last years. The Life Cycle Assessment (LCA) is known as one of the most complete and complex quantitative tools for the environmental assessment of buildings. The standards ISO 14040 and 14044, are the methodological frameworks of the LCA. The standards EN 15978 and 15804 are methodological frameworks of LCA to buildings. All of them guarantee the transparency and accountability of results.*

*The literature evidences several prejudices about complexity and difficulty in LCA application to buildings, especially during the data collection. Several studies recognize that the integration of BIM (Building information Modeling) to LCA can reduce efforts during the acquisition, as well as allowing the feedback of both tools. The aim of this study is to develop a simplified tool based on LCA, to assess quantitative environmental impacts of residential buildings during their life cycle, conceived as a decision-oriented tool. Thus, the integration of BIM models in LCA is assumed as a starting point.*

*In the context of Uruguay, the inexistence of quantitative tools generates opportunities for its development. It addresses comparatively different construction alternatives and functional distributions of the most common dwelling typology developed in this context: the single-family house. Case 1 addresses the comparison of three alternatives of building envelopes for the same house. Case 2 compares three different building solutions.*

*The discussion of results analyzes the scope and limitations of the developed tool, as well as including recommendations and challenges for the BIM-LCA integration. The conclusions evidence that the developed tool can help to provide data on the environmental impacts expressed in a clear and effective way from the early stages of design. It also can help in decision-making about different constructive solutions and to visualize the impacts that they produce from the early stages of design.*



## Introducción al lector y estructura de la Tesis

---

La presente Tesis Doctoral se presenta como un compendio de publicaciones, las cuales estructuran el contenido de la misma, al tiempo que han servido de pilares fundamentales para cimentar la línea de investigación que conduce este trabajo. El contenido de la misma se organiza de acuerdo con lo descrito en el Art. 9 del Acuerdo 9.1/CG 19-4-12 por el que se aprueba la normativa reguladora del régimen de la Tesis Doctoral de la Universidad de Sevilla, y consta de lo siguiente: una introducción en la que se justifica la unidad temática de la tesis, los objetivos a alcanzar, un resumen global y discusión de estos resultados y las conclusiones finales. La presente Tesis estructura estos contenidos de acuerdo con los siguientes capítulos: *Capítulo 1 Introducción a la temática y objetivos de la presente Tesis*; *Capítulo 2 Resumen y discusión de resultados obtenidos*; *Capítulo 3 Conclusiones*.

La estructura de estas publicaciones parte de un análisis del Estado del Arte y una revisión de los antecedentes, verificados principalmente mediante las publicaciones del Artículo I, Artículo II y Comunicación I. Posteriormente se ha desarrollado una propuesta metodológica de herramienta simplificada BIM-ACV, basada en los principales referentes en este campo de investigación y abordada en la Comunicación II. Finalmente se ha procedido a su verificación, mediante su aplicación a un casos de estudio seleccionados en el contexto de Uruguay y cuyos resultados han sido tratados en el Artículo III.

En el Apartado *1.6 Organización de contenidos e interacción de publicaciones* se explica pormenorizadamente la estructura de la presente Tesis Doctoral.

## Lista de publicaciones

---

### Artículos publicados en revistas indexadas en JCR

#### Artículo I

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.

*Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments.*

Building and Environment 103 (2016) 215-227.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014> 0360-1323

#### Artículo II

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.

*Critical review of BIM-based LCA method to buildings.*

Energy and Buildings 136 (2017) 110-120.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009> 0378-7788

### Artículos en fase de revisión en revistas indexadas en SJCR

#### Artículo III

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez, Juan Carlos Gómez de Cózar.

*BIM-based LCA method to analyze envelope alternatives of a single-family houses:*

*case study in Uruguay.*

Journal of Architectural Engineering

Special Issue of Housing in Journal of Architecture Engineering.

En revisión por pares

### Comunicaciones publicadas en congresos nacionales

#### Comunicación I

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.

*Simplificaciones aplicadas al Análisis del Ciclo de Vida de viviendas*

Libro de Comunicaciones Científicas de Greencities (2015). Málaga. pág. 181-196.

#### Comunicación II

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.

*Propuesta metodológica simplificada para la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) en tipologías de viviendas unifamiliares*

Libro de Comunicaciones Científicas de Greencities (2016). Málaga

## Abreviaturas

<i>AEC: Architecture, Engineering and Construction.</i>	Arquitectura, Ingeniería y Construcción.
<i>ADP<sub>e</sub>: Abiotic resource depletion potential for elements</i>	Potencial de agotamiento de recursos abióticos para elementos
<i>ADP<sub>f</sub>: Abiotic resource depletion potential of fossil fuels</i>	Potencial de agotamiento de recursos para combustibles fósiles
<i>AIA: American Institute of Architects</i>	-
-	ANV: Agencia Nacional de Vivienda (Uruguay)
<i>AP: Acidification potential of land and water</i>	PA: Potencial de acidificación de tierra y agua
<i>ASCE: American Society of Civil Engineers</i>	-
<i>BIM: Building Information Modeling</i>	-
<i>LCA: Life Cycle Assessment</i>	ACV: Análisis del Ciclo de Vida
<i>LCC: Life Cycle Cost</i>	ACVE: Análisis del Ciclo de Vida Económico
-	CEN: Comité Europeo de Normalización
<i>EPD: Environmental Product Declaration</i>	DAP: Declaración Ambiental de Producto
<i>EPA-NR: Energy Performance Assessment for Existing Non Residential Buildings</i>	-
<i>EIA: Environmental Impact Assessment</i>	Evaluación de Impacto Ambiental
<i>EN: European Norm</i>	Norma Europea
<i>EP: Eutrophication potencial</i>	PE: Potencial de eutrofización
<i>EU: European Union</i>	UE: Unión Europea
-	GEL: Gases de efecto invernadero
<i>GWP: Global Warming Potential</i>	Potencial de calentamiento global
<i>HT: Human Toxicity</i>	Toxicidad Humana
<i>IEA EBC: International Energy Agency. Energy in Buildings and Community</i>	-



## Abreviaturas

<i>IFC: Industry Foundation Classes</i>	IM: Intendencia de Montevideo
-	Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
<i>IPPC: The Intergovernmental Panel on Climate Change</i>	Organización Internacional de Normalización
<i>ISO: International Standard Organization</i>	-
<i>JCR: Journal Citation Report</i>	-
<i>LCI: Life Cycle Inventory Analysis</i>	ICV: Análisis Inventario de Ciclo de Vida
<i>LCIA: Life Cycle Impact Assessment</i>	EICV: Evaluación del Impacto de Ciclo de Vida
<i>LOD: Level of Development</i>	Nivel de desarrollo
-	MIEM: Ministerio de Industria, Energía y Minería (Uruguay)
<i>ODP: Stratospheric Ozone Depletion potential.</i>	Potencial de agotamiento de la capa de ozono estratosférica
<i>PCR: Product Category Rules</i>	RCP: Reglas de Categoría de Producto
<i>SJCR: Scimago Journal &amp; Country Rank</i>	-
<i>SETAC: Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i>	-
<i>SLCA: Social Life Cycle Assessment</i>	ASCV: Análisis del Ciclo de Vida Social
<i>UN: United Nations</i>	Naciones Unidas
-	UNE: Una Norma Española
<i>UNEP: United Nations Environmental Programme</i>	PNUMA: Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente
<i>UNEP-SBCI: United Nations Environment Program - Sustainable Buildings &amp; Climate Initiative</i>	-
-	UNIT: Instituto Uruguayo de Normas Técnicas

## Lista de figuras

<b>Figura 1.</b> Esquema de las fases del ACV.	<b>18</b>
<b>Figura 2.</b> Esquema de organización de fases y módulos del ciclo de vida de un edificio.	<b>19</b>
<b>Figura 3.</b> Esquema del mix energético de Uruguay del año 2015.	<b>22</b>
<b>Figura 4.</b> Esquema de metodología de investigación desarrollada donde se evidencia la correlación entre las fases de la investigación, los principales ejes temáticos abordados, las hipótesis de partida y las publicaciones que componen el trabajo.	<b>33</b>
<b>Figura 5</b> Esquema de metodología propuesta.	<b>49</b>
<b>Figura 6</b> Esquema de interacción de herramientas y recursos.	<b>51</b>
<b>Figura 7</b> Esquema del diagrama de flujo del proceso de evaluación del comportamiento ambiental de los edificios.	<b>55</b>
<b>Figura 8</b> Esquema de límite del sistema considerado para el caso 1.	<b>74</b>
<b>Figura 9</b> Esquema de límite del sistema considerado para el caso 2.	<b>75</b>
<b>Figura 10</b> Localización esquemático de los niveles de transporte asumidos para asignación de distancias recorridas por los materiales.	<b>79</b>
<b>Figura 11</b> Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	<b>88</b>
<b>Figura 12</b> Resultados obtenidos para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría ODP (kg CFC 11 eq.).	<b>88</b>
<b>Figura 13</b> Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría FWE (points)	<b>89</b>
<b>Figura 14</b> Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría HT (points)	<b>89</b>
<b>Figura 15</b> Comparación de impactos derivados del transporte de la “cuna a la puerta” (A4) que producen las alternativas consideradas.	<b>90</b>
<b>Figura 16</b> Comparación de impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) y energía operacional utilizada (B6).	<b>90</b>
<b>Figura 17</b> Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría AP (kg SO <sub>2</sub> eq.)	<b>92</b>
<b>Figura 18</b> Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	<b>92</b>
<b>Figura 19</b> Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría EP (kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3</sup> eq.)	<b>93</b>
<b>Figura 20</b> Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría FWE (points)	<b>93</b>
<b>Figura 21</b> Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría HT (points)	<b>93</b>
<b>Figura 22</b> Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría ODP (kg CFC 11 eq.)	<b>94</b>
<b>Figura 23</b> Comparación de impactos derivados del transporte de la “cuna a la puerta” (A4) que producen las viviendas consideradas.	<b>94</b>

## Lista de tablas

---

<b>Tabla 1.</b> Esquema de implementación de tipos de ACV según el proyecto EeBGuide.	<b>37</b>
<b>Tabla 2.</b> Casos de estudio analizados.	<b>39</b>
<b>Tabla 3.</b> Casos de estudio seleccionados para análisis de estrategias de integración BIM-ACV.	<b>44</b>
<b>Tabla 4.</b> Ficha tipo de material.	<b>53</b>
<b>Tabla 5.</b> Hipótesis sobre los factores de reposición utilizados para la aplicación de la metodología en los casos de estudio.	<b>62</b>
<b>Tabla 6.</b> Definición de modelo de asignación de transportes.	<b>63</b>
<b>Tabla 7.</b> Tipo de datos a utilizar según lo establecido por la norma EN 15978.	<b>66</b>
<b>Tabla 8.</b> Esquema de módulos de información definidos por EN 15978 incluidos en los casos de estudio.	<b>73</b>
<b>Tabla 9.</b> Lista de materiales BIM utilizados en los casos de estudio.	<b>78</b>
<b>Tabla 10.</b> Estimación de los consumos energéticos de los edificios evaluados.	<b>80</b>
<b>Tabla 11.</b> Hipótesis de horarios de permanencia de ocupantes de las viviendas por estancia.	<b>80</b>
<b>Tabla 12.</b> Relación de materiales básicos con procesos unitarios seleccionados.	<b>82</b>
<b>Tabla 13.</b> Resumen de las fuentes de datos utilizadas en la elaboración del inventario de ACV.	<b>83</b>
<b>Tabla 14.</b> Resumen de resultados obtenidos tras la evaluación del caso 1.	<b>85</b>
<b>Tabla 15.</b> Resumen de resultados obtenidos tras la evaluación del caso 2.	<b>88</b>



# Índice

Agradecimientos	4
Resumen	6
Abstract	7
Introducción al lector y estructura de la Tesis	8
Lista de publicaciones	9
Abreviaturas	10
Lista de figuras	12
Lista de tablas	13
<b>Capítulo 1. Introducción a la temática y objetivos de la presente Tesis</b>	<b>16</b>
1.1 Introducción	17
1.2 Interés y oportunidad	24
1.3 Hipótesis	26
1.3.1 Hipótesis generales	26
1.3.2 Hipótesis particulares	26
1.4 Objetivos y alcance de la presente Tesis Doctoral	27
1.4.1 Objetivos específicos	27
1.5 Metodología	28
1.5 Organización de contenidos e interacción de publicaciones	30
1.7 Gráfico explicativo de la metodología desarrollada	33
<b>Capítulo 2. Resumen y discusión de los resultados obtenidos</b>	<b>34</b>
2.1 Simplificaciones en ACV de edificios residenciales <b>(Artículo I) (Comunicación I)</b>	<b>35</b>
2.1.1 Breve análisis de casos de estudio sobre la aplicación de simplificaciones a la metodología de ACV en viviendas unifamiliares	38
2.1.2 Estrategias de simplificación aplicadas a casos residenciales	40
2.2 Integración de herramientas BIM-ACV <b>(Artículo II)</b>	<b>42</b>
2.2.1 Breve análisis de casos de estudio que integran herramientas BIM a la metodología ACV	43
2.2.2 Estrategias de integración BIM-ACV	44
2.2.2.1 Principales desafíos identificados	45
2.3 Propuestas de metodología ACV simplificada aplicada a edificios de tipo residencial <b>(Artículo III) (Comunicación II)</b>	<b>47</b>
2.3.1 Descripción de la metodología propuesta	48
2.3.2 Esquema de interacción de herramientas y recursos utilizados	51
2.3.3 Propuesta de procedimiento de aplicación	52

## Índice

---

2.3.3.1 Definición de equivalente funcional	56
2.3.3.2 Definición de límite del sistema	57
2.3.3.3 Definición de escenarios del ciclo de vida	61
2.3.3.3.1 Escenarios para la etapa de producto	61
2.3.3.3.2 Escenarios para la etapa de construcción	61
2.3.3.3.3 Escenarios para la etapa de uso	62
2.3.3.3.4 Escenarios para asignación de transportes (A4, B2, B3, B4, B5, C2)	62
2.3.3.3.5 Escenarios para el uso de energía en servicio	63
2.3.3.3.6 Escenario para la etapa de fin de vida	64
2.3.3.4 Cuantificación del edificio y su ciclo de vida	65
2.3.3.5 Selección de categorías de impacto y métodos de evaluación	66
2.3.3.6 Definición de comunicación de resultados	67
2.3.4 Justificación de las principales estrategias de simplificación del ACV aplicadas y de integración BIM-ACV	68
2.4 Aplicación de la metodología simplificada a casos de estudio: comparación de alternativas para la envolvente de una vivienda unifamiliar y comparación de 3 soluciones de viviendas unifamiliares ( <b>Artículo III</b> )	70
2.4.1 Definición del objetivo y alcance	71
2.4.1.1. Definición de equivalentes funcionales	72
2.4.1.2 Límite del sistema	73
2.4.1.3 Categorías de impacto	76
2.4.2 Elaboración del inventario del ACV	77
2.4.2.1 Criterios de inclusión de entradas y salidas del sistema	81
2.4.2.2 Definición de procesos unitarios a incluir	81
2.4.2.3 Criterios de calidad de los datos empleados	83
2.4.3 Evaluación de impactos	84
2.4.4 Estructura de los datos de salida y comunicación de resultados	84
2.4.4.1 Impactos caso 1	85
2.4.4.2 Impactos caso 2	89
2.4.5 Discusión de resultados obtenidos	93
2.4.5.1 Interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo con las fases del ciclo de vida	93
2.4.5.2 Interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo con los principales materiales empleados	93

2.4.5.3 Interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo con las categorías de impactos de materiales empleados	94
2.4.5.4 Interpretación de los resultados obtenidos como instrumentos de evaluación en fases de diseño	95
2.4.5.5 Limitaciones de los resultados obtenidos y de aspectos operativos de la metodología propuesta	95
2.4.5.6 Recomendaciones para el desarrollo de herramientas y aplicaciones informáticas de evaluación ambiental de edificios residenciales que integren BIM-ACV en fases de diseño	96
<b>Capítulo 3. Conclusiones</b>	
3.1 Conclusiones sobre el nivel de cumplimiento de los objetivos	99
3.2 Conclusiones sobre el desarrollo de la propuesta metodológica	100
3.3 Conclusiones sobre los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología al contexto de Uruguay	101
3.4 Propuesta de futuras líneas de investigación	102
<b>Bibliografía</b>	106
<b>Glosario</b>	125
<b>Anexos</b>	
Anexo 1.1. Artículos publicados en revistas científicas indexadas en JCR (Q1)	
Anexo 1.2. Artículos en fase de revisión en revistas científicas indexadas en SCJR (Q1)	
Anexo 2. Documentación complementaria sobre casos de estudio	
Anexo 3. Manual de instalación de herramienta <i>BIM-ACV single-family houses V1.0</i>	
Anexo 4. Comunicaciones a Congresos nacionales	







# Capítulo 1

---

## Capítulo 1. Introducción a la temática y objetivos de la presente Tesis

- 1.1 Introducción
- 1.2 Interés y oportunidad
- 1.3 Hipótesis
  - 1.3.1 Hipótesis generales
  - 1.3.2 Hipótesis particulares
- 1.4 Objetivos y alcance de la presente Tesis Doctoral
  - 1.4.1 Objetivos específicos
- 1.5 Metodología
- 1.6 Organización de contenidos e interacción de publicaciones
- 1.7 Gráfico explicativo de la metodología desarrollada



## 1.1 Introducción

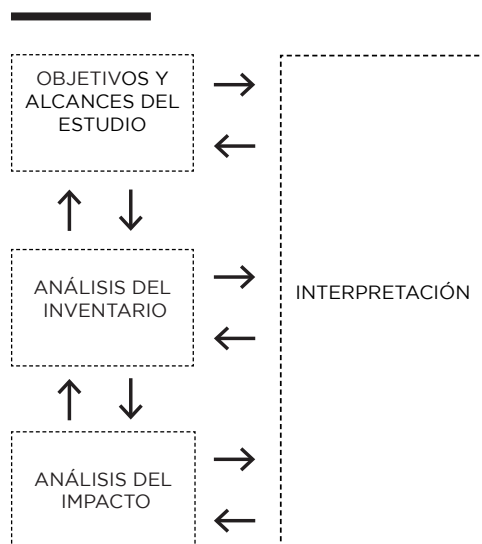
Las metodologías y herramientas de evaluación ambiental de edificios surgieron hace más de veinticinco años y constituyen unos de los principales instrumentos de eco-diseño de edificios y sistemas constructivos. Desde sus orígenes, Cole (1998) y Ding (2008) afirman que la evaluación ambiental de edificios ha emergido como uno de los instrumentos de mayor importancia en la construcción sostenible, siendo la metodología BREEAM (BRE, 2017) (Gran Bretaña) la que marcó el inicio (Cole, 2005). En este período relativamente corto, las sucesivas generaciones de estos instrumentos han evolucionado como resultado de la experiencia acumulada y los nuevos conocimientos y enfoques adquiridos (Cole, 2005).

El acto de evaluar es establecer un puente entre los objetivos ambientales y estrategias de desempeño del edificio durante las etapas de diseño, construcción y ocupación (Ding, 2008). Las metodologías y herramientas de evaluación ambiental configuran un conjunto de criterios e indicadores ambientales que son relevantes para el edificio, organizados y priorizados para reflejar su desempeño. Cole (1998) define las metodologías y herramientas de evaluación ambiental de edificios como técnicas desarrolladas para evaluar, mediante una amplia gama de consideraciones ambientales, el desempeño de un edificio en fase de diseño o construido. Varios estudios (Ding, 2004; Horvat and Fazio, 2005; Mateus and Bragança, 2011) hacen hincapié en el rol de estas herramientas como orientadores en los procesos de diseño, toma de decisiones a la hora de definir estrategias efectivas de diseño ambiental; y reportar información durante las fases de diseño, cons-

trucción y uso del edificio.

La evolución de las metodologías y herramientas de evaluación ambiental ha sido creciente en los últimos años, lo que sumado al agravamiento de los problemas ambientales y a la urgencia existente en la búsqueda de respuestas desde diversos sectores, hace que cada vez más sea necesario el desarrollo de métodos más exhaustivos que amplíen el rango de consideraciones ambientales (Ding, 2004). Diversos estudios reconocen la existencia de cerca de 600 métodos y herramientas existentes en todo el mundo, que evalúan en diferente grado e intensidad aspectos sociales, económicos y ambientales vinculados al sector de la construcción (Reed et al., 2009).

A nivel general es posible clasificar estas herramientas y métodos de evaluación en dos grupos, retomando los criterios establecidos por Reijnders and Van Roekel (1999). El primer grupo de evaluaciones indica la relativa “responsabilidad ambiental” definida por un número de características exigidas sobre el desempeño ambiental del edificio. Este grupo, llamado “credit-weighting” scale según Sev, (2011), o check-list según Llatas et al. (2010) consiste en la aplicación de una lista de verificaciones o sugerencias a incorporar en las etapas de diseño y construcción del edificio, donde en la mayoría de los casos está asociada a la asignación de calificaciones y procesos de certificaciones. Por otra parte, estos métodos y herramientas en general se basan en evaluaciones de tipo cualitativo del desempeño ambiental del edificio. Estos sistemas establecen, dependiendo del método o de la herramienta empleada, distintos



**Figura 1.** Esquema de las fases del ACV. (Fuente: elaboración propia basada en normas ISO 14040 y ISO 14044)

rangos donde se pueden alcanzar distintas certificaciones o umbrales de calidad.

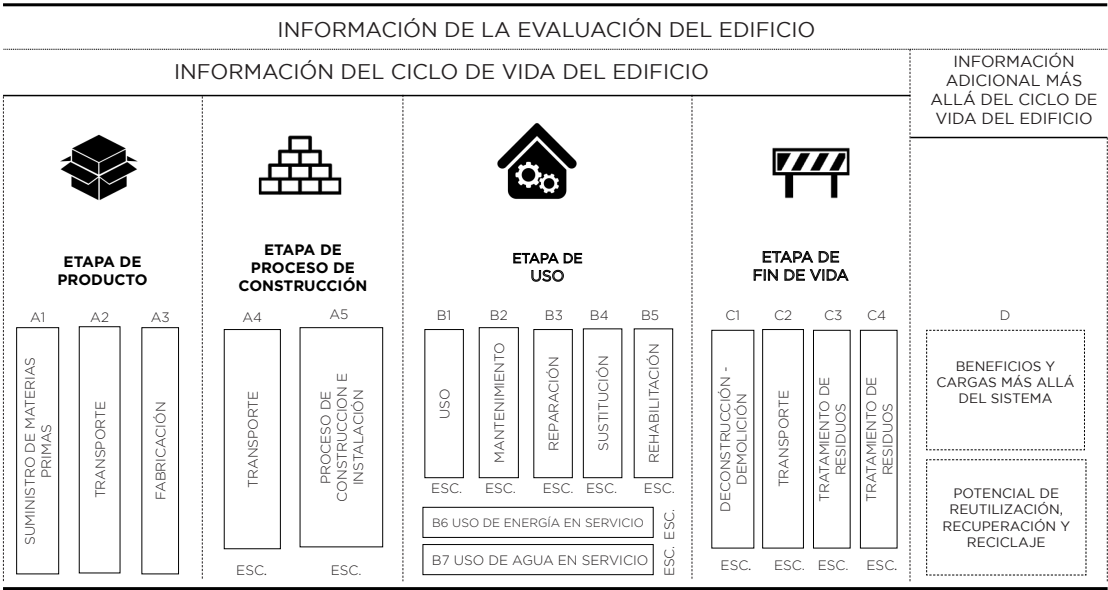
El segundo grupo de herramientas, se basa en la aproximación al Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del edificio, cuyo marco normativo se inicia a partir de la serie de normas ISO 14040 (ISO, 2006a) a la ISO 14044 (ISO, 2006b). Estos instrumentos permiten realizar una evaluación ambiental cuantitativa del desempeño ambiental del edificio (Reijnders and Van Roekel, 1999). A diferencia de los métodos y herramientas de evaluación tipo check-list, estas nos aportan información sobre el impacto que causan los edificios en el ambiente durante todas las fases de su Ciclo de Vida: diseño, construcción, uso y demolición. Sin embargo, permite entre otros aspectos calcular el carbono contenido y determinar el potencial de reciclado de los diferentes materiales (Rossi et al., 2012).

De acuerdo con el marco normativo de referencia se entiende al Ciclo de Vida como las “etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema o producto, desde la adquisición de materia prima

o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final” (ISO, 2006a, 2006b).

El ACV se define como la “recopilación y evaluación de las entradas y las salidas y los impactos ambientales potenciales de un producto a través de su Ciclo de Vida” (ISO, 2006a). Conforme al marco metodológico establecido por la serie de normas ISO 14040 *Gestión ambiental. Análisis del Ciclo de Vida* (ISO, 2006a), se establecen 4 fases (Figura 1): la definición de alcances y objetivos, el análisis del inventario de ciclo de vida, la evaluación de los impactos ambientales y la fase de interpretación de los resultados.

Dada la heterogeneidad de criterios y complejidad que implica la aplicación de la metodología ACV en el sector de la construcción, a nivel Europeo el CEN/Technical Committee 350 ha desarrollado métodos voluntarios de estandarización a través de la serie de normas EN 15978 (EN, 2011) y EN 15804:2012 (EN, 2012a). Estas incorporan la metodología ACV para la evaluación tanto de nueva construcción o existente, como para evaluaciones



**Figura 2.** Esquema de organización de fases y módulos del ciclo de vida de un edificio.  
(Fuente: elaboración propia basado en norma EN 15978)

de productos para edificios. Los aspectos referidos al comportamiento ambiental de los edificios están contenidos en la norma EN 15978 (EN, 2011). El objetivo es la elaboración de una metodología única válida para los países de la Unión Europea basada en el ACV (EN, 2011). Dicho marco normativo servirá como punto de partida para desarrollar el presente trabajo, debido a la inexistencia de normas en este ámbito que se ajusten al contexto de referencia, Uruguay.

A nivel general este marco normativo surge a partir de los requisitos generales para la evaluación de la sostenibilidad de los edificios que se describen en la serie de normas EN 15643-1 a 15643-4, las cuales incluyen un marco general (EN 159643-1 (EN, 2010)), un marco para el comportamiento ambiental (EN 159643-2 (EN, 2012b)), social (EN 159643-3 (EN, 2012c)), y económico (EN 159643-4 (EN, 2012d)). En este sentido, el proceso de evaluación de cada uno de estos aspectos se define

a través de las siguientes normas: EN 15978 (EN, 2011) (comportamiento ambiental), EN 16309 (ISO, 2014) (comportamiento social) y EN 16627 (EN, 2015) (comportamiento económico).

Para la aplicación de este método de evaluación la norma EN 15978 (EN, 2011) indica que se debe establecer el propósito de la evaluación definido por el alcance y el uso previsto de la evaluación. También describe cómo debe llevarse adelante la especificación del objeto de la evaluación, la cual engloba la definición del equivalente funcional, el período de estudio de referencia y la definición del límite del sistema (EN, 2011).

El límite del sistema se establece siguiendo el “principio de modularidad”, los procesos que afecten al comportamiento del edificio durante su ciclo de vida se deben incluir dentro de los módulos que correspondan (EN, 2011). La Figura 2 muestra la organización de los diferentes módu-



los de información para la evaluación del edificio. Dentro del límite del sistema estos módulos se organizan de acuerdo con 4 etapas: etapa de producto, etapa de proceso de construcción, etapa de uso y etapa de fin de ciclo de vida.

La norma EN 15978 (EN, 2011) también presenta cómo debe llevarse adelante la descripción del edificio durante su ciclo de vida, así como también la “cuantificación del edificio y su ciclo de vida”, la selección de los datos ambientales, el cálculo de indicadores ambientales, la comunicación de los resultados y su verificación.

Al margen de la aplicación de esta norma, la aplicación del ACV en edificios puede ser llevada adelante a través de herramientas de cálculo, algunas diseñadas específicamente para edificios (EQUER (IZUBA énergies, 2017), ELODIE (CSTB, 2017), Athena Impact Estimator for Buildings (Athena Sustainable Materials Institute, 2017), entre otros) y otras de nivel general (SimaPro (PRé Sustainability, 2017) y Gabi (Thinkstep, 2017)).

En este sentido, destaca el creciente interés en el desarrollo de instrumentos que pretenden fomentar la aplicación de la metodología de ACV en el sector de la edificación. Algunos de estos son los proyectos: REGENER (REGENER Project, 1996), IEA ANNEX 31 (IEA, 2005), EeB Guide Project (2012), LoRE-LCA (SINTEF Building and Infrastructure et al., 2011), Enslic (KTH and all partners contributions, 2010), BENEFIS (CSTB et al., 2015), SOFIAS (Isasi et al., 2016), CILECCTA (CILECCTA project, 2013), los cuales han contribuido a avanzar y promover el uso de esta metodología en la evaluación de impactos ambientales que produ-

cen los edificios en el contexto europeo.

El proyecto SOFIAS (Isasi et al., 2016), desarrollado en el contexto español, promueve la aplicación de la metodología de ACV en edificios, y persigue tanto a nivel metodológico como en la comunicación de los resultados ajustarse a la norma EN 15978 (EN, 2011).

Previo a la aparición de la norma EN 15978, el proyecto ENSLIC (ENSLIC, 2010) define 3 niveles para la realización de ACV en edificios. El nivel básico, comprende el cálculo básico mediante entradas y salidas de datos simples, contemplando unos pocos indicadores de impacto ambiental y para el cual se requiere poca experiencia su uso. El nivel medio, establece la aplicación de softwares específicos tales como EQUER (IZUBA énergies, 2017), ELODIE (CSTB, 2017), Ecoeffect, entre otros, para lo cual se requiere algo de experiencia en el uso de ese tipo de herramientas. En el nivel avanzado los cálculos se realizan mediante herramientas tales como SimaPro (PRé Sustainability, 2017), Gabi (Thinkstep, 2017), para lo cual es necesario poseer gran experiencia con el manejo de estos softwares.

Por otra parte, cabe destacar que las principales barreras en la utilización de las herramientas de tipo ACV en la práctica están dadas por el intenso requerimiento de datos, intenso trabajo y complejidad requerido (Malmqvist et al., 2011). La complejidad y las incertidumbres en la obtención de resultados han sido consideradas como algunas de las barreras en el uso de este tipo de herramientas. Existen en torno al tema una producción científica que demuestra las diversas posibilidades que existen de cara a la definición de métodos

que simplifiquen la aplicación de las herramientas tipo ACV para su aplicación en la evaluación de impactos ambientales en edificios (John, 2012; Kellenberger and Althaus, 2009; Lasvaux, 2010; Malmqvist et al., 2011; Zabalza Bribián et al., 2009).

El proyecto Europeo ENSLIC (ENSLIC, 2010) establece una serie de recomendaciones para llevar adelante la aplicación de esta herramienta teniendo en cuenta los aspectos más significativos a la hora de cuantificar los impactos (Glaumann et al., 2010). Malmqvist et al. (2011) demuestran que es posible realizar simplificaciones a esta metodología sin que los resultados se vean sustancialmente afectados. Se ha demostrado que se pueden simplificar o reducir los elementos de construcción considerados, centrándose en los más significativos. Además se puede realizar la simplificación del análisis del inventario remitiéndose a los aspectos más significativos que contribuyan a ciertas categorías y se pueden simplificar los cálculos focalizándose sólo en algunas categorías, entre otros.

En ese sentido, el proyecto europeo EeB Guide Project(2012), define tres niveles posibles de aplicación de la metodología de ACV: nivel exploratorio (*Screening*), nivel simplificado (*Simplified*) y nivel completo (*Complete*). Para estos niveles establece de acuerdo con la norma 15978 (EN, 2011) los módulos de información y el nivel de detalle de la información que deberá contener la aplicación del ACV.

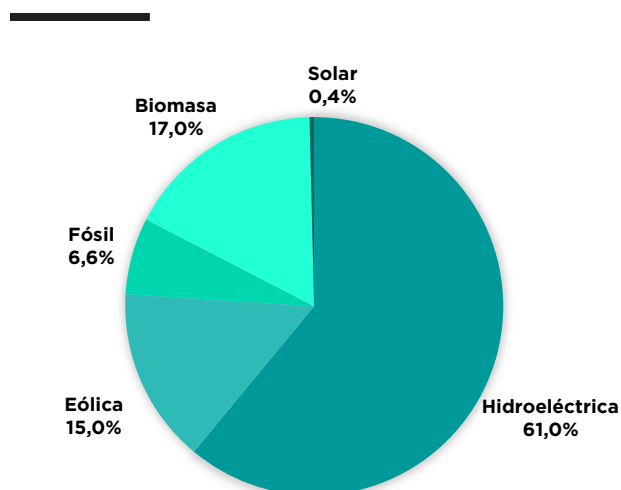
Por otro lado, el uso de herramientas de diseño tipo BIM en AEC (Architecture, Engineering and

Construction) ha permitido optimizar los procesos de diseño y gestión de datos de los edificios. Su desarrollo ha experimentado grandes avances en los últimos años y se destaca además su creciente impulso derivado de la promoción del uso de herramientas BIM en proyectos públicos, a través de Directrices Europeas 2014/24 (Official Journal of the European Union, 2014). En el contexto latinoamericano, Chile está iniciando la promoción del uso de BIM en el sector de la edificación (CORFO, 2016).

Actualmente el uso de ambas herramientas se realiza de forma independiente ya que, por un lado, se utilizan las herramientas BIM para el modelado de edificios y así cuantificar los materiales utilizados y por otro se emplean los softwares o herramientas de cálculo de ACV para obtener los impactos ambientales (Rist, 2011).

Por otra parte, en Uruguay se están experimentando diversos avances hacia la reducción del impacto de las actividades humanas en el medioambiente. Entre ellas destaca la transformación de la matriz energética (Figura 3), posibilitando que a partir del año 2015 la producción de energía eléctrica provenga de fuentes mayoritariamente renovables (DNE-MIEM, 2015).

Cabe destacar, que en el sector de la edificación se constata la incorporación de instrumentos de evaluación ambiental desde ámbitos institucionales. Dichas medidas abarcan, entre otros, los “Programas de Normalización y Etiquetado de Eficiencia Energética” promovidos por el MIEM (MIEM, 2015) y UNIT, e institucionalizado por medio de la Ley N° 18.597 de Uso Eficiente de la



**Figura 3.** Esquema del mix energético de Uruguay del año 2015.  
(Fuente: elaboración propia basada en Balance Energético 2015)

Energía (Poder Legislativo and República Oriental del Uruguay, 2009), aprobada en el mes de septiembre de 2009. Por otra parte, destaca la aparición en los últimos años de estrategias, tales como el método SuAmVi (Sustentabilidad Ambiental de la Vivienda) de evaluación ambiental de edificios residenciales, desarrollado por la Intendencia de Montevideo (IM, 2011).

El definido modelo SuAmVi se presenta como una herramienta de ayuda a la toma de decisiones basándose en criterios cualitativos (tipo check-list) sobre siete áreas temáticas: implantación, aire, energía, agua, residuos, materiales y gestión de obra; estableciendo criterios de evaluación en cada caso (IM, 2011).

Por otra parte, destacan, como antecedentes generados en torno al tema central de esta Tesis, el Trabajo de Fin de Master titulado “Estudio de indicadores de sostenibilidad en sistemas de evalua-

ción LEED y HADES aplicados a edificios de uso residencial, cultural y universitario”, (Soust-Verdaguer, 2012) desarrollado dentro del Master en Ciudad y Arquitectura Sostenible, edición 2011-2012, de la Universidad de Sevilla.

La presente Tesis Doctoral se desarrolla dentro del programa de doctorado en Arquitectura de la Universidad de Sevilla y se enmarca dentro de la línea de investigación “La sostenibilidad desde lo técnico, tecnológico y productivo” y el Departamento de Construcciones Arquitectónicas I.

Por otra parte, el grupo de investigación TEP 130 Arquitectura, patrimonio y sostenibilidad de la Universidad de Sevilla en el que se inserta este trabajo como Tesis Doctoral, cuenta con varios antecedentes que respaldan la idoneidad en el tema de estudio, entre los que destacan: “Análisis del Ciclo de Vida de edificios. Propuesta metodológica para la elaboración de declaraciones am-

bientales en Andalucía” (García-Martínez, 2010), y “Aplicación del análisis del ciclo de vida a la gestión de los residuos de construcción” (Bizcocho Tocon, 2014), ambos tutorizados por Carmen Llatas Oliver. Del mismo modo, destaca la línea de trabajo sobre la utilización de herramientas BIM en la evaluación ambiental de edificios, asentada dentro del MIATD (Master en Innovación en Arquitectura: Tecnología y Diseño) de la Universidad de Sevilla, desarrollada mediante los trabajos de: Mesa Gonzalez (2013), Navarro Osta (2014), Gómez Pérez (2014), Ruiz Alfonsea (2016).

En Uruguay este trabajo se inserta en la línea de investigación sobre sostenibilidad en la construcción, desarrollada en torno a la Maestría en Cons-

trucción de Obras de Arquitectura de la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Udelar, de cuyos trabajos caben destacar: “La energía como indicador del impacto ambiental en los sistemas constructivos conformados a partir de materiales de producción nacional, Tesis de Maestría, UFRGS-UDELAR (Casañas, 2011) y “Análisis de la energía incorporada de un edificio en altura en Uruguay” Tesis de Maestría, UFRGS-UDELAR (Peluffo, 2011), entre otros.

Por tanto, el marco de trabajo expuesto genera condiciones favorables que viabilizan el desarrollo de la presente propuesta y a su vez fomenta y posibilita la vinculación académica e investigadora entre ambas instituciones y países.

## 1.2 Interés y oportunidad

Numerosos estudios demuestran como los edificios suponen un considerable impacto sobre el ambiente. El quinto Informe de Evaluación del IPCC sitúa a los edificios como responsables del 6.4% de las emisiones directas de CO<sub>2</sub> producidas a la atmósfera y responsables del 19% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero y de la emisiones indirectas procedentes de la producción eléctrica y térmica (IPCC, 2014).

A esto se suma que, el sector de la edificación es responsable de alrededor del 40% del consumo actual de recursos, incluido un 12% de toda el agua potable y de la generación de más del 40% de los residuos sólidos (UNEP-SCI, 2012). Estos hechos alertan sobre la presión que ejerce el sector de la construcción y los impactos que genera sobre el ambiente. Este creciente consumo de materiales y la asociada generación de residuos sólidos y líquidos subrayan la necesidad de la industria de la construcción de desarrollar, utilizar y disponer de estrategias para su desarrollo de forma más sostenible (Emmanuel, 2004).

Por otra parte, se sitúa al sector de los edificios como el de mayor potencial de mitigación de gases efecto invernadero, y a menor costo en relación a otros sectores (IPCC, 2007; UNEP-SBCI, 2009). Estos estudios demuestran las posibilidades que encierra este sector para mitigar algunos de los efectos negativos que está produciendo la crisis ecológica global. Varios autores (Cole, 1998; Crawley and Aho, 1999; San-José et al., 2007) están de acuerdo con la idea de que no es posible continuar diseñando y construyendo sin tener en cuenta y sin evaluar el impacto de los edificios en

el medioambiente. Este *modus operandi* ayudaría directamente a tener en consideración los impactos y efectos en el medioambiente generados por este sector.

Actualmente varios países están desarrollando nuevas herramientas o métodos de evaluación de estos impactos, incorporando aspectos tanto cualitativos como cuantitativos. Cabe destacar, por ejemplo, el caso de Portugal donde se está desarrollado el método MARS-H. Este método está basado en la herramienta SBTool y en las normas técnicas CEN/TC350 (Mateus et al., 2008; Mateus and Bragança, 2011). Este tipo de herramienta incorpora aspectos de las evaluaciones tipo checklist con criterios definidos en la metodología de ACV, de forma simplificada.

En el contexto actual, existe un creciente desarrollo de trabajos que demuestran las potencialidades del uso de herramientas BIM como instrumentos de ayuda a la construcción sostenible. Muchos de ellos son utilizados para optimizar el consumo energético y maximizar el uso de la iluminación natural (Rahmani Asl et al., 2015), para analizar la incidencia de luz natural en los edificios (Kota et al., 2014), para reducir la producción de residuos (Akinade et al., 2017, 2015; Cheng and Ma, 2013; Liu et al., 2015), así como también para evaluar los impactos ambientales producidos durante el ciclo de vida del edificio (Azhar et al., 2008; Basbagill et al., 2013; Jalaei, 2014; Kylili et al., 2015; Peng, 2014; Seo et al., 2007; Shadram et al., 2016). Entre estos destaca el llevado a cabo por Shadram et al. (2016), el cual desarrolla un marco metodológico que integra herramientas de diseño tipo BIM con

datos obtenidos a partir de EPD (Environmental Product Declaration) de productos de construcción, como instrumento de ayuda en la toma de decisiones y selección de materiales. Estos avances metodológicos, sumado a la importancia que va adquiriendo el uso de softwares tipo BIM en el diseño de edificios, genera un campo fértil de experimentación y oportunidades de innovación.

En Uruguay, se están experimentando diversos avances hacia la reducción de los impactos que producen las actividades humanas en el medioambiente, siendo uno de los países de América Latina donde se han verificado mayores avances hacia la implementación de fuentes renovables de producción de energía eléctrica (UNEP, 2016). Por otra parte, dentro del sector de la edificación destaca la aparición en los últimos años de diversas iniciativas tales como el método SuAmVi de evaluación ambiental de edificios residenciales, desarrollado por la Intendencia Municipal de Montevideo, Uruguay (IM, 2011).

De acuerdo con lo informado por las autoridades locales de la Comisión Ambiental de la IM, actualmente el método SuAmVi se encuentra en su etapa de implementación y se entiende necesario seguir avanzando sobre este tipo de instrumentos (IM, 2011). Se trata de un “modelo” de evaluación tipo check-list cuya forma de definición de los créditos asignables ha sido consensuada por expertos. Constituye un método de evaluación que centra su atención en aspectos ambientales y no incorpora criterios que puedan evaluar aspectos sociales y económicos (IM, 2011). El proceso de evaluación se basa en la verificación del cumplimiento de medidas que se entienden beneficiosas

para reducir el impacto de los edificios en el entorno, sin evaluar cuantitativamente los impactos ambientales generados por este sector.

Diversos estudios llevados a cabo en centros científicos de diversos países han elegido la estrategia de la elección de tipologías frecuentes para implementar el proceso de evaluación ambiental utilizando la metodología de ACV. Cuéllar-Franca and Azapagic (2012) han desarrollado la evaluación ambiental del sector residencial del Reino Unido mediante esta estrategia. El estudio ha permitido demostrar que gran parte de los impactos producidos por las dos tipologías más frecuentes se registran en las fases de uso, mientras que las mayores oportunidades en la producción de mejoras se producen en las etapas de diseño dado que las mismas son las que definen los impactos en las sucesivas fases (Cuéllar-Franca and Azapagic, 2012). Del mismo modo, Hanandeh (2015) ha desarrollado para el caso de Jordania la evaluación de los impactos ambientales que producen las 6 configuraciones más típicas de viviendas unifamiliar para este contexto. Agya Utama et al. (2012) por su parte, han llevado a cabo la comparación de los impactos ambientales que producen diferentes alternativas de materiales utilizados para la envolvente, una alternativa tradicional y una de más reciente utilización para el contexto de Indonesia.

Fuentes oficiales también confirman que más del 75% de la población vive en viviendas unifamiliares (INE, 2017). De acuerdo con todo lo anteriormente expuesto, este trabajo centrará su atención en esta tipología de vivienda construida en el contexto de Uruguay. Por otra parte, se reconoce que,



en este contexto, los ocupantes de las viviendas se componen en gran medida por más de 2 integrantes, en el 46 % de los hogares hay menores y de ese porcentaje el 86% de las viviendas tiene como máximo 2 menores de 11 años (INE, 2014). De modo que se asume como hipótesis de elección de las tipologías, viviendas unifamiliares de 3 dormitorios.

Por otra parte, técnicos locales confirman la inexistencia a nivel académico o institucional, de estudios que cuantifiquen y describan mediante la utilización de herramientas de ACV los impactos ambientales producidos por el sector residencial y que puedan ser utilizadas para orientar la toma de decisiones. Esta carencia genera condiciones para aportar nuevas bases científicas en la puesta en marcha de proyectos existentes tales como el método SuAmVi, mediante el diseño de una herramienta de evaluación que utilice criterios cuantitativos para evaluar tipologías residenciales en fase de diseño. Por tales motivos, esta Tesis Doctoral pretende articularse con el desarrollo de este modelo, centrándose en diseñar una herramienta de evaluación cuantitativa que pueda aportar y complementar este método de evaluación.

## 1.3 Hipótesis

### 1.3.1 Hipótesis generales

Este trabajo parte de las siguientes hipótesis:

**H1.** Es posible elaborar una herramienta simplificada basada en ACV que permita evaluar de forma cuantitativa los impactos ambientales producidos por los edificios residenciales.

**H2.** Es posible integrar herramientas BIM y ACV con el fin de reducir esfuerzos en la adquisición y manejo de datos de los edificios evaluados.

**H3.** Es posible desarrollar un método de evaluación ambiental que integre modelos BIM en la metodología ACV y que pueda aplicarse en las primeras fases de diseño.

### 1.3.2 Hipótesis particulares

**H4.** Es posible aplicar la metodología desarrollada para evaluar los impactos ambientales producidos por la tipología residencial más frecuente en el contexto de Uruguay.

## 1.4 Objetivos y alcance de la presente Tesis Doctoral

El objetivo general de este trabajo es:

**OG.** El objetivo general de este trabajo es la elaboración de una herramienta simplificada de ayuda al diseño que sea aplicada al sector residencial y que pueda ser aplicada a un contexto determinado.

Con esta herramienta se pretende definir y cuantificar los impactos ambientales que producen los edificios durante su Ciclo de Vida, focalizándose en la tipología residencial más frecuente.

### 1.4.1 Objetivos específicos

Los objetivos específicos que se esperan alcanzar con la metodología llevada a cabo son:

**OE.1.** Definir estrategias de simplificación de la metodología de ACV, de cara a su aplicación en el sector residencial y especialmente en tipologías de viviendas unifamiliares.

**OE.2.** Establecer criterios de integración de la metodología de ACV con herramientas de diseño tipo BIM, que puedan incorporar la evaluación de los impactos ambientales desde las primeras fases de diseño del edificio.

**OE.3.** Diseñar una metodología basada en el ACV que integre modelos BIM, que se ajuste a los contenidos definidos por las normas de referencia ISO 14040 (ISO, 2006a), ISO 14044 (ISO, 2006b), EN 15978 (EN, 2011) y 15804 (EN, 2012a), y mediante la cual se puedan obtener datos sobre los impactos ambientales que producen los edificios residenciales.

**OE.4.** Verificar experimentalmente la herramienta diseñada aplicándola a casos de estudio representativos (tipología edificatoria más frecuente: vivienda unifamiliar) para el contexto de Uruguay. La verificación de la aplicación a casos de estudio busca comparar inicialmente diferentes alternativas de materiales en distintas soluciones de elementos constructivos. Posteriormente se busca comparar 3 casos de viviendas unifamiliares de diferentes características constructivas.

**OE.5.** Obtener datos comparativos sobre los casos de estudio analizados.

**OE.6.** Definir recomendaciones, a partir de la metodología elaborada, para orientar el desarrollo de aplicaciones informáticas que permita aplicar el ACV a edificios en fase de diseño, de forma sencilla y amigable con el usuario, a partir de modelos BIM.

## 1.5 Metodología

La metodología (Figura 4) para alcanzar los objetivos de esta Tesis Doctoral toma como punto de partida las investigaciones anteriormente realizadas por el grupo de investigación TEP 130 en el contexto en la Universidad de Sevilla: “Análisis del Ciclo de Vida de edificios. Propuesta metodológica para la elaboración de declaraciones ambientales en Andalucía”, de García-Martínez, (2010) y “Aplicación del análisis de ciclo de vida a la gestión de los residuos de construcción” Bizcocho Tocon (2014); así como las desarrolladas en el contexto de Uruguay, “La energía como indicador del impacto ambiental en los sistemas constructivos conformados a partir de materiales de producción nacional” de Casañas (2011), y “Análisis de la energía incorporada de un edificio en altura en Uruguay” de Peluffo (2011) entre otros.

A partir de la realización de una base fundamentalmente teórica, se pretende verificar las hipótesis planteadas y lograr los objetivos específicos del proyecto, que finalmente permitirán alcanzar el objetivo general.

Para ello, se desarrollarán las siguientes fases y etapas:

### Fase 1

- Etapa **1.1:** En esta fase se establecen los fundamentos metodológicos, el interés y oportunidad del desarrollo de la presente Tesis, y así como también los objetivos y el alcance de la investigación.

### Fase 2

- Etapa **2.1:** Elaboración del estado de la cuestión que incluye el análisis de antecedentes e identi-

ficación de principales referentes en el tema de estudio. Para ellos se plantea una revisión bibliográfica sobre el objeto de estudio, en artículos publicados en revistas científicas de alto impacto, informes de investigación y tesis doctorales. Se analizan los principales avances y resultados obtenidos por otros investigadores en relación a la incorporación de simplificaciones en la aplicación del ACV en edificios residenciales y en la integración de herramientas BIM en la aplicación del ACV.

- Etapa **2.2:** Propuesta de herramienta simplificada basada en ACV. En esta etapa se diseña la herramienta simplificada basada en la integración de herramientas BIM y ACV, diseñada para la evaluación ambiental desde la fase de diseño de tipologías edificatorias. Se propone un modelo de análisis que permita estructurar los procesos que se suceden en el transcurso del ciclo de vida de los edificios y se delimitan las hipótesis de partida para la definición de datos y escenarios del ciclo de vida. Finalmente se diseña el modelo metodológico y la información a comunicar y se indican los límites y el ámbito de aplicación de la investigación.

- Etapa **2.3:** Verificación de la herramienta. En esta etapa se verifica el desempeño de la herramienta simplificada mediante su aplicación a casos de estudio concretos, en el contexto de Uruguay.

Se procede a la aplicación de la metodología en los casos de estudio seleccionados, los cuales se centrará en la evaluación de alternativas materiales en primer lugar para la envolvente de una vivien-

das son viviendas unifamiliares de 3 dormitorios: una vivienda social unifamiliar promovidas por la ANV (ANV-MVOTMA, 2017), una vivienda construida en madera siguiendo criterios de sostenibilidad (La Casa Uruguaya (LCU)- Solar Decathlon 2015 (Universidad ORT. Uruguay, 2015) ) y una vivienda unifamiliar singular desde el punto de vista del diseño arquitectónico (Casa RIFA- 2013 (Souza et al., 2013)). Con esta etapa se pretende realizar los ajustes o modificaciones que se consideren necesarios y verificar el nivel de cumplimiento con las normas técnicas de referencia. En esta etapa se incluye la elaboración de hipótesis de simplificaciones y escenarios del ciclo de vida para posibilitar la aplicación del ACV, la recopilación de datos, y la organización de la información obtenida en las etapas anteriores.

### Fase 3

- Etapa **3.1:** Discusión de resultados. Se realiza el análisis y discusión de los resultados obtenidos. Se procede a la comparación de los resultados obtenidos.

A partir de los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología a los casos de estudio, se elaboran las recomendaciones para el diseño de herramientas que posibiliten la integración de modelos BIM en la aplicación del ACV desde las primeras fases de diseño de edificios.

-Etapa **3.2:** Conclusiones. Se extraen las conclusiones correspondientes.

-Etapa **3.3:** Futuras líneas de investigación. Finalmente se proponen futuras líneas de investigación a desarrollar a partir de este trabajo de investigación.

## 1.5 Organización de contenidos e interacción de publicaciones

Dado que la presente Tesis se presenta como compendio de publicaciones, los principales ejes temáticos que articulan este trabajo, se organizan de acuerdo con los cuatro capítulos que estructuran el trabajo.

El **Capítulo 1** esboza los principales antecedentes y referentes claves para el desarrollo de este trabajo. También se define el marco teórico, las principales normas y estándares que sientan las bases del presente trabajo. Al mismo tiempo, se identifican el interés y oportunidades en el desarrollo del trabajo. Este capítulo también contiene la descripción de los objetivos generales y particulares que pretende alcanzar esta Tesis Doctoral.

El **Capítulo 2** contiene el resumen global y discusión de los resultados obtenidos, los cuales se articulan en función de los siguientes ejes temáticos:

### 2.1. Simplificaciones en ACV de edificios residenciales.

A través del análisis de los principales casos de estudio centrados en el tema se identifican y analizan las principales estrategias de simplificación aplicadas al ACV en viviendas unifamiliares, la tipología residencial, más frecuente y la que mayores impactos produce.

### 2.2. Integración de herramientas BIM a la aplicación del ACV.

El siguiente apartado analiza mediante el estudio de casos las principales estrategias metodológicas de integración BIM-ACV. El análisis se articula en

función de una estructura de flujo de la información definida por la entrada de datos, el análisis de los datos y la comunicación de los resultados.

### 2.3. Propuesta metodológica de una herramienta que a partir de modelos BIM pueda aplicar el ACV en casos residenciales.

Este apartado desarrolla una estrategia metodológica que permite integrar herramientas BIM y ACV. La metodología propuesta pretende que su aplicación sea de forma sencilla por parte del usuario durante la fase de diseño y que guarde representatividad para un contexto determinado. Se describe la estructura de organización de la información y las principales fases que la componen. Se representa el procedimiento de aplicación de la misma, así como la interacción de ambas herramientas (BIM-ACV) y los recursos complementarios necesarios.

**2.4 Verificación de la metodología propuesta y discusión de los resultados mediante su aplicación en casos de estudio localizados en Uruguay.** El siguiente apartado se centra en la aplicación de la metodología a las tipologías residenciales más representativas del contexto de Uruguay. Se describe el procedimiento de aplicación y las hipótesis asumidas para la obtención de datos y los recursos complementarios asumidos. Se procede a la discusión de resultados y a la comparación de los mismos.

El **Capítulo 3** desarrolla las conclusiones del trabajo, analizando la consecución de los objetivos planteados, la propuesta metodológica y los resultados obtenidos de su aplicación en los ca-

sos de estudio. Finalmente se definen las futuras líneas de investigación que abre este trabajo.

Por otra parte, tal y como se describía anteriormente, los contenidos de este trabajo han sido publicados previamente en tres artículos científicos y dos comunicaciones a congresos, de las cuales la autora de esta Tesis Doctoral es la primera autora, en coautoría con los directores.

Los Artículos I y II se han publicado en revistas científicas referentes globales en la temática de ACV de edificios, tales como *Building and Environment* (Artículo I) y *Energy and Buildings* (Artículo II) ambas de la editorial Elsevier, indexadas en el Journal Citation Report (JCR), y pertenecientes al cuartil 1 (Q1) en la categoría Building and Construction. Los factores de impacto de las revistas son 3.394 para *Buiding and Environment* y 2.973 para la revista *Energy and Buildings*. La revista Journal of Architectural Engenieering, a la que se ha enviado el Artículo III, constituye también un referente en el campo de la Ingeniería y Arquitectura, especialmente en el contexto de EEUU, siendo además una revista indexada en el SJCR y perteneciente al cuartil 1 (Q1) en la categoría *Architecture*. La producción del Artículo III para esta revista indexada del ASCE (American Society of Civil Engineers), ha sido iniciada mediante invitación expresa de uno de sus editores (PhD Ali M. Memari), derivado del interés suscitado por el Artículo I y convocados en calidad de expertos en el tema ACV de viviendas unifamiliares. Actualmente el trabajo está en proceso de revisión por pares para su consideración de formar parte de la *Special Section on Housing and Residential Building Construction* de dicha revista.

A continuación, se especifican los ejes temáticos que han seguido cada una de las publicaciones que componen este trabajo y su correlación con la consecución de las hipótesis y objetivos trazados para el desarrollo de esta investigación. También se incluye una breve descripción del contenido de cada publicación.

### Eje temático 1:

1. Simplificaciones en ACV de edificios residenciales.

#### Artículo I

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.

*Simplification in life cycle assessment of single-family houses: A review of recent developments.* Building and Environment 103 (2016) 215-227. <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014> 0360-1323

Esta publicación se centra en examinar los trabajos que aplican el ACV a viviendas unifamiliares, que han sido publicados en estos últimos cinco años -posteriores a la publicación de la norma EN 15798 (EN, 2011). El trabajo analiza la aplicación de la metodología de ACV y extrae conclusiones sobre las estrategias de simplificaciones aplicada en cada uno de los casos.

### Eje temático 2:

2. Integración de herramientas BIM a la aplicación del ACV.

#### Artículo II

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.

*Critical review of BIM-based LCA method to buildings.*

Energy and Buildings 136 (2017) 110–120.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009>  
 0378-7788

La publicación examina los últimos avances publicados hacia la integración de herramientas BIM en la aplicación del ACV. En él se exponen los principales aspectos que hacen que la integración de ambas herramientas (BIM-ACV) suponga una optimización en el proceso de recopilación de datos durante la fase de inventario. Además se profundiza en el análisis sobre cómo estas estrategias de integración pueden reducir los esfuerzos y optimizar la aplicación del ACV en edificios.

### Ejes temáticos 3 y 4:

3. Propuesta metodológica de una herramienta que a partir de modelos BIM pueda aplicar el ACV en casos de edificios residenciales.

4. Verificación de la metodología propuesta mediante su aplicación en casos de estudio localizados en Uruguay.

#### Artículo III

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez, Juan Carlos Gómez de Cózar.

*BIM-based method to analyze envelope alternatives of a single-family houses: case study in Uruguay.*

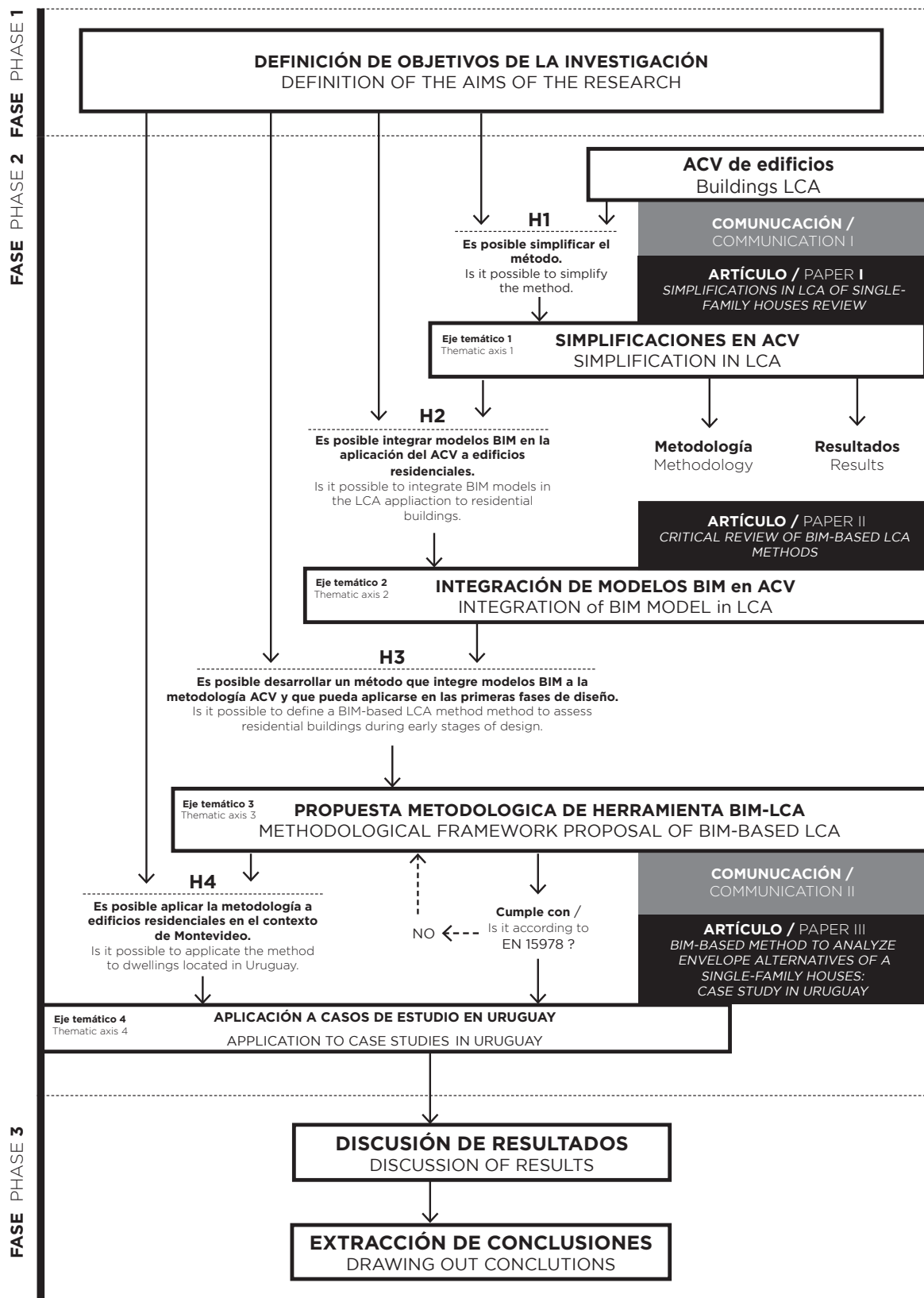
Journal of Architectural Engineering  
*Special Section on Housing and Residential Building Construction.*

En revisión

El artículo describe la propuesta metodológica desarrollada, la estructura de datos y la organización de la información para llevar a cabo la integración de ambas herramientas (BIM-LCA). También se procede a la validación de la metodología propuesta mediante su aplicación en un caso de estudio: una vivienda unifamiliar situada en el contexto de Uruguay.



## 1.7 Gráfico explicativo de la metodología desarrollada



**Figura 4.** Esquema de metodología de investigación desarrollada donde se evidencia la correlación entre las fases de la investigación, los principales ejes temáticos abordados, las hipótesis de partida y las publicaciones que componen el trabajo. (Fuente: elaboración propia)



## Capítulo 2

---

### 2.1 Simplificaciones en ACV de edificios residenciales **(Artículo I) (Comunicación I)**

2.1.1 Breve análisis de casos de estudio sobre la aplicación de simplificaciones a la metodología de ACV en viviendas unifamiliares

2.1.2 Estrategias de simplificación aplicadas a casos residenciales

### 2.2 Integración de herramientas BIM a la metodología ACV **(Artículo II)**

2.2.1 Breve análisis de casos de estudio que integran BIM-ACV

2.2.2 Estrategias de integración herramientas BIM-ACV

2.2.2.1 Principales desafíos de la integración

### 2.3 Propuestas de metodología ACV simplificada aplicada a edificios de tipo residencial

#### **(Artículo III) (Comunicación I)**

2.3.1 Descripción de metodología propuesta

2.3.2 Esquema de interacción de herramientas y recursos utilizados en la metodología propuesta

2.3.3 Propuesta de procedimiento de aplicación

2.3.3.1 Definición de equivalente funcional

2.3.3.2 Definición de límite del sistema

2.3.3.3 Definición de escenarios del ciclo de vida

2.3.3.4 Cuantificación del edificio y su ciclo de vida

2.3.3.5 Selección de categorías de impacto y métodos de evaluación

2.3.3.6 Definición de comunicación de resultados

2.3.4 Justificación de las principales estrategias de simplificación del ACV aplicadas y de integración BIM-ACV

### 2.4 Aplicación de la metodología simplificada a casos de estudio: comparación de alternativas para la envolvente de una vivienda unifamiliar y comparación de 3 soluciones de viviendas unifamiliares

#### **(Artículo III)**

2.4.1 Definición de objetivo y alcance

2.4.1.1. Definición de equivalentes funcionales

2.4.1.2 Límite del sistema

2.4.1.3 Categorías de impacto

2.4.2 Elaboración del inventario de ACV

2.4.2.1 Criterios de inclusión de entradas y salidas del sistema

2.4.2.2 Definición de procesos unitarios a incluir

2.4.2.3 Criterios de calidad de los datos empleados



#### 2.4.3 Evaluación de impactos

#### 2.4.4 Estructura de los datos de salida y comunicación de resultados

##### 2.4.4.1 Impactos caso 1

##### 2.4.4.2 Impactos caso 2

#### 2.4.5 Discusión de resultados obtenidos

##### 2.4.5.1 Interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo con las fases del ciclo de vida

##### 2.4.5.2 Interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo con los principales materiales empleados

##### 2.4.5.3 Interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo a las categorías de impactos

##### 2.4.5.4 Interpretación de los resultados obtenidos como instrumentos de evaluación en fases de diseño

##### 2.4.5.5 Limitaciones de los resultados obtenidos y de aspectos operativos de la metodología propuesta

##### 2.4.5.6 Recomendaciones para el desarrollo de herramientas y aplicaciones informáticas de evaluación ambiental de edificios residenciales que integren BIM-ACV en fases de diseño

##### 2.4.5.7 Herramienta *BIM based LCA single-family houses beta 1.0*



## 2.1 Simplificaciones en ACV de edificios residenciales

(Artículo I) (Comunicación I)

El creciente desarrollo que ha experimentado en los últimos años la aplicación de la metodología de ACV en el sector de la edificación, demuestra sus potencialidades a la hora de llevar adelante procesos de evaluación de impactos ambientales tanto en edificios nuevos, edificios en fase de rehabilitación, de diversas tipologías, así como también a escala urbana o regional (Buyle et al., 2013; Cabeza et al., 2014; Lotteau et al., 2015; Sharma et al., 2011).

Antecedentes sobre el tema señalan la complejidad e incertidumbre del ACV como algunas de las principales barreras para llevar adelante este proceso de evaluación en edificios (Zabalza Bribián et al., 2009); al mismo tiempo que reconocen la necesidad de establecer simplificaciones a la metodología de ACV aplicada a edificios (Zabalza Bribián et al., 2009).

A nivel general, SETAC (Christiansen, 1997) define al ACV simplificado como una evaluación aproximada, que abarca de forma superficial todo el ciclo de vida (mediante el uso de datos genéricos, cualitativos o cuantitativos, y módulos estándar para el transporte y producción de energía), asumiendo una evaluación de impactos simplificada (teniendo en cuenta aspectos ambientales seleccionados) y una interpretación de los resultados. Para el caso particular de los edificios, Zabalza Bribián et al., (2009) consideran necesaria la aplicación de simplificaciones para reducir esfuerzos en la obtención de datos. John, (2012) define mediante el estudio de casos de edificios tipo bloque de vivienda colectiva en Suiza, una serie de simplificaciones fiables, buscando alterar lo menos posible la representatividad de los resultados ob-

tenidos. Para los casos evaluados, John establece que se deben utilizar los elementos más relevantes para la edificación, aislamientos y productos de polímeros, así como también los más comunes en fases de uso, construcción y sustitución (John, 2012). Además la omisión de algunos elementos que no sean relevantes en el edificio puede ser otra forma razonable de reducir esfuerzos sin que los resultados puedan perder representatividad (John, 2012).

Lasvaux, (2010) también define un modelo simplificado para la aplicación del ACV, en el contexto de Francia. El trabajo estudia modelos de simplificación aplicados en los flujos de datos del inventario del ciclo de vida, el cálculo de las categorías de impactos, las fases del ciclo de vida y el número de materiales que contribuyen a la producción de los impactos (Lasvaux, 2010).

Por otra parte, el proyecto EeB Guide (2012) busca instrumentar y complementar la aplicación de las principales normas de referencia para la aplicación del ACV, EN 15978 (EN, 2011) y EN 15804 (EN, 2012a) en el sector de la edificación. Este proyecto pretende también regular la aplicación de simplificaciones a la metodología buscando mejorar la comparabilidad y fiabilidad de los resultados.

Mediante los tres niveles establecidos (Tabla 1) -exploratorio (*Screening*), simplificado (*Simplified*) y completo (*Complete*), se define un rango aproximado de información a incorporar sobre el edificio, así como las fases y módulos del ciclo de vida relevantes en función del objetivo de cada uno de los niveles. Para cada uno de estos niveles se establecen de forma estimada el alcance, nivel de detalle y reglas de cálculo para cada una de las fases y módulos de información del ciclo de vida del edificio. Los grados de incorporación de los módulos de información podrán ser: Obligatorio (OB), Opcional en función de la relevancia (OP) u Opcional en función de la disponibilidad de datos (OR).

De acuerdo con lo establecido por el EeBGuide (EeB Guide Project, 2012) los niveles de aplicación “*Screening*” y “*Simplified*” incluyen de forma obligatoria elementos constructivos como el techo, la estructura de carga, los muros exteriores y enterrados, ventanas, vigas, cimentaciones, terminaciones de suelo y coberturas. Mientras que información referida a equipamiento de refrigeración, calefacción, iluminación, y producción de energía, terminaciones decorativas, puertas, equipamiento de circulación interior (Ej. escale-

ras, ascensores), sistemas de distribución de electricidad, se deja reservada a la disponibilidad de datos. Por su parte en nivel de aplicación completo establece que debe incorporarse de forma obligatoria todos los datos referidos anteriormente sobre el edificio.

Teniendo en cuenta los contenidos de esta guía, se evidencia que no existen reglas estrictas sobre el nivel de detalle de información y módulos de información sobre el ciclo de vida que deba incorporarse durante la aplicación del ACV de forma simplificada, así como también cómo deben realizarse las hipótesis para reducir esfuerzos en la aplicación y posibilitar la evaluación de los impactos ambientales en la fase de diseño del edificio.

De modo que, más allá de lo establecido por los antecedentes en relación a la información específica que debe incorporarse en la aplicación del ACV, el principal desafío está en poder integrar la mayor cantidad de información sobre el ciclo de vida del edificio, sin que esto suponga mayores esfuerzos en la recopilación de datos y su procesamiento, asegurando la mayor fiabilidad en los resultados obtenidos.

**Tabla 1.** Esquema de implementación de tipos de ACV según el proyecto EeBGuide  
(Fuente: elaboración propia basado en EeBGuide project)

			“Screening” Diagnóstico		“Simplified” Simplificado		“Complete” Completo
			OB	OP	OB	OP	OB
A1	A2	A3	Reglas de cálculo basadas en datos genéricos.		Reglas de cálculo basadas en datos genéricos		Reglas de cálculo basadas en DAPs (EPDs) de materiales específicos
	A4		OP		OP		OB
	A5		OD		OD		OB
	B1		OP		OP		OB
	B2		OP		OP		OB
	B3		OD		OD		OD
	B4		OD		OB		OB
	B5		OP		OP		OB
			OB		OB		OB
	B6		Reglas de cálculo basadas en el desempeño esperado		Reglas de cálculo basadas en el “Simulación térmica dinámica”		Reglas de cálculo basadas en el “Simulación térmica dinámica”, metodologías nacionales de evaluación o EPA-NR
			OB		OB		OB
	B7		Reglas de cálculo basadas en datos estadísticos		Reglas de cálculo basadas en enfoque de “arriba hacia abajo”		Reglas de cálculo basadas en enfoque de “abajo hacia arriba”
			OD		OD		OB
	C1				Reglas de cálculo basadas en ratios de materiales		Reglas de cálculo basadas en energía, materiales y emisiones relacionadas.
	C2		OD		OD		OB
	C3		OP		OB	OP	OB
			Reglas de cálculo basadas en datos específicos o genéricos sobre ACV.		Reglas de cálculo basadas en datos específicos o genéricos sobre ACV.		OB
	C4						Reglas de cálculo basadas en datos específicos o genéricos sobre ACV.
			OP		OB	OP	OB
	D		Reglas de cálculo basadas en datos específicos o genéricos sobre ACV.		Reglas de cálculo basadas en datos específicos o genéricos sobre ACV.		Reglas de cálculo basadas en datos específicos o genéricos sobre ACV, para reutilización, reparación y potencial de reciclado

Referencias: OB, Obligatorio; OP, opcional en función de la relevancia; OD, opcional en función de la disponibilidad de datos.

### 2.1.1 Breve análisis de casos de estudio sobre la aplicación de simplificaciones a la metodología de ACV en viviendas unifamiliares

En los siguientes apartados se pondrá énfasis en identificar los principales referentes dentro de la bibliografía y a través de su análisis se determinarán las estrategias de simplificación adoptadas. La incidencia de las tipologías de viviendas unifamiliares en la producción de impactos ambientales en el sector residencial, genera oportunidades para avanzar en el diseño de estrategias que ayuden a reducir esos impactos. Petersdorff et al. (2006) reconocen que constituye una de las tipologías de viviendas que mayores impactos ambientales produce en el contexto europeo.

Por otra parte, la revisión de casos de estudio basados en tipologías residenciales demuestra el creciente interés que está teniendo la aplicación del ACV en la tipología de viviendas unifamiliares, siendo de las que más cantidad de casos de estudio se han publicado recientemente. En los últimos 5 años se han publicado más de 60 trabajos en revistas indexadas en JCR, de las cuales más del 30% representan casos de viviendas unifamiliares.

El estudio en más profundidad de estos casos permite caracterizar la forma de aplicación de la metodología, así como también caracterizar en función de las referencias normativas las principales estrategias de simplificación llevadas adelante en

cada uno de los casos. Destaca la diversidad de contextos y enfoques de los casos identificados. Los casos de estudio incorporados en el estudio son trabajos publicados en los últimos cinco años, fecha estimada a partir de la cual se publicó la norma EN 15978 (EN, 2011) y forman parte de revistas científicas indexadas incluidas en el JCR (Journal Citation Report).

El análisis de casos de estudio (Tabla 2), centrado en identificar las principales estrategias de simplificación aplicadas, se dividió en 2 fases. La primera se centró en analizar las fases de la aplicación de la metodología de ACV -definición de alcances y objetivos, elaboración del inventario del ciclo de vida, evaluación de los impactos e interpretación de resultados-, incluyendo la definición de la unidad funcional, las características del objeto de estudio, las fuentes de datos, la estructura de la información, los procedimientos de cálculo de las categorías de impacto, el uso de herramientas de cálculo auxiliares, las categorías de impactos estudiadas, entre otros. La segunda se centró en el análisis de las etapas del ciclo de vida del edificio, de modo que de acuerdo con los “módulos de información” definidos por la norma EN 15978 (EN, 2011), han sido identificadas las fases más relevantes que han sido incluidas en cada estudio.



**Tabla 2.** Casos de estudio analizados (Fuente: elaboración propia)

Referencia	País	Características tipología evaluada
Agya Utama et al., 2012	Indonesia	Vivienda unifamiliar “típica”
Babaizadeh et al., 2015	EEUU	Viviendas unifamiliares “típicas”
Cuéllar-Franca and Azapagic, 2012	Reino Unido	Tres viviendas unifamiliares “típicas”
Dahlstrøm et al., 2012	Noruega	Dos viviendas unifamiliares (una convencional y una Passivhaus)
Fouquet et al., 2015	Francia	Tres viviendas unifamiliares (Passivhaus)
Gervasio et al., 2014	Portugal	Vivienda unifamiliar “típica”
Hanandeh, 2015	Jordania	Seis viviendas unifamiliares
Houlihan Wiberg et al., 2014	Noruega	Vivienda unifamiliar “típica”
Iddon and Firth, 2013	Reino Unido	Vivienda unifamiliar
Islam et al., 2014	Australia	Vivienda unifamiliar “típica”
Lewandowska et al., 2013	Polonia	Cuatro viviendas unifamiliares (Passivhaus)
Monteiro and Freire, 2012	Portugal	Vivienda unifamiliar
Mosteiro-Romero et al., 2014	EEUU / Suiza	Dos viviendas unifamiliares
Motuzien et al., 2016	Lithuania	Vivienda unifamiliar eficiente
Oyarzo and Peuportier, 2014	Chile	Vivienda unifamiliar
Peuportier et al., 2013	Francia	Vivienda unifamiliar (Passivhaus)
Proietti et al., 2013	Italia	Vivienda unifamiliar
Rosselló-Batlle et al., 2015	España	Vivienda unifamiliar
Rossi et al., 2012	Bélgica, Suecia y Portugal	Tres viviendas unifamiliares
Takano et al., 2015	Finlandia	Vivienda hipotética

### 2.1.2 Estrategias de simplificación aplicadas a casos residenciales

Los resultados derivados del análisis de los casos de estudio han permitido demostrar la diversidad de criterios y estrategias aplicadas, lo que plantea la necesidad de sistematizar la definición de simplificaciones a la aplicación del ACV, especialmente en tipología edificatorias tales como la vivienda unifamiliar. En particular esta tipología residencial es una de las que genera mayores impactos (Petersdorff et al., 2006), siendo una de las tipologías edificatorias en las que durante los últimos años se ha publicado un mayor número de trabajos científicos centrados en el ACV y además es la tipología más numerosa en el contexto en el que posteriormente se centrarán los casos de estudio (Uruguay) (INE, 2017).

De modo que, de acuerdo con los resultados obtenidos, las estrategias de simplificación han sido aplicadas en algunos casos para optimizar la aplicación de la metodología y en otros casos destinadas a reducir esfuerzos en la obtención de los datos. El estudio de casos realizado ha podido identificar las siguientes estrategias de simplificación:

- Optimización de la recopilación de datos del edificio, mediante el uso de herramientas de ayuda al diseño, tales como BIM software, por ejemplo.

- Reducción de la unidad funcional a una parte del edificio (ej. la envolvente), o a una unidad de referencia (ej. 1m<sup>2</sup> de área acondicionada).

- Limitación del estudio a las fases y módulos de información, sobre el edificio, más relevantes, tales como por ejemplo fases de produc-

ción y construcción (A1-A2-A3-A4-A5), consumo de energía operacional (B6), mantenimiento (B2) y fin del ciclo de vida (C1-C2-C4).

- Simplificación de la definición de escenarios, por ejemplo, asumir como escenario de disposición final el vertedero supone la reducción de esfuerzos en la gestión de residuos de demolición. (Esto evidencia la necesidad de avanzar hacia la definición de herramientas que permitan reducir los esfuerzos en la aplicación de estrategias de recuperación y reciclaje de residuos de demolición y construcción durante la aplicación del ACV).

- Utilización de bases de datos genéricas para el cálculo de impactos.

- Empleo de métodos de cálculo para caracterizar los impactos.

- Reducción del número de categorías de impacto incluidas en el análisis.

El análisis efectuado también ha demostrado la heterogeneidad de las estrategias aplicadas, lo cual reduce las posibilidades de comparación de los resultados entre diferentes estudios. Al igual que lo indicado por el proyecto EeB Guide Project, (2012) sobre los niveles de aplicación del ACV (Tabla 1), este estudio ha permitido demostrar que no existen criterios estrictos para la aplicación de simplificaciones, en las tipología de viviendas unifamiliares. De esta manera, ha sido posible identificar algunas recomendaciones y desafíos que plantea la aplicación de simplificaciones aplicadas al ACV de viviendas unifamiliares:

- Estandarización de procesos de fabricación de algunos materiales frecuentes en las tipologías residenciales, así como también la definición de criterios comunes tales como la modelización de procesos (transportes, mantenimiento, reparación, rehabilitación, reciclaje) de acuerdo con las características del contexto, lo cual puede otorgar mayores garantías a la hora de comparar resultados.

- Incorporación de herramientas BIM para reducir el esfuerzo en la obtención de datos, sobre todo en la contabilización de materiales y componentes del edificio.

- Incluir el uso de DAPs (*EPDs*) para cuantificar los impactos que producen los mate-

riales o componentes del edificio en fase de producción. El uso de estas declaraciones ambientales reduce sensiblemente los esfuerzos en la aplicación del ACV así como aumenta las garantías de los resultados obtenidos. Actualmente la principal limitación que presenta esta alternativa es que el uso de este tipo de instrumentos no se encuentra muy extendido en todos los contextos y tipos de materiales, y especialmente los utilizados en la tipología de viviendas unifamiliar.

- De cara a la comunicación de los resultados es necesario avanzar hacia el establecimiento de criterios que permitan comparar resultados parciales sobre, por ejemplo, los diferentes materiales o componentes que conforman el edificio.

## 2.2 Integración de herramientas BIM-ACV (Artículo II)

Los softwares BIM son capaces de gestionar datos sobre el modelo virtual del edificio (datos gráficos del edificio), así como también sobre las cualidades y características de los materiales que lo componen. El nivel de desarrollo (LOD, Level of Development) de estos modelos constituye uno de los aspectos claves en el entorno de trabajo BIM, el cual se utiliza para describir la riqueza de la información que contiene el modelo BIM, así como también la cantidad en la información que contiene este modelo (Volk et al., 2014). En este sentido el AIA (American Institute of Architecture) ha definido este concepto como el rango que describe la información referida a aspectos dimensionales, espaciales, cuantitativos, cualitativos y otros datos incluidos en un modelo (AIA, 2013). Por otra parte, el AIA ha establecido 5 niveles para clasificar este concepto: LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 400 y LOD 500. El LOD 100 define la geometría del edificio, en el LOD 200 además de la geometría se reconocen los espesores de los elementos constructivos, en el LOD 300 se incorporan los espesores de las capas de los elementos constructivos; estos niveles son utilizados durante la fase de diseño del edificio. El LOD 400 incorpora información sobre elementos que componen el edificio previo a la fase de construcción, cuyo nivel de mediciones es exacto. El LOD 500 constituye el nivel detalle as built e incluye información sobre los elementos que componen el edificio tal y como ha sido construido.

Diversos trabajos subrayan las potencialidades que encierra el uso de softwares BIM para mejorar el comportamiento ambiental de los edificios durante las fases de toma de decisiones (Antón Álvarez and Díaz, 2014; Kreiner et al., 2015a;

Medas et al., 2015; Wong and Zhou, 2015). En ese sentido, las ventajas de integración de herramientas BIM en la aplicación del ACV son reconocidas por diversos trabajos de referencia (Ajayi et al., 2015; Basbagill et al., 2013; Gantner et al., 2014; Jalaei and Jrade, 2014; Jrade and Jalaei, 2013; Kreiner et al., 2015b; Lee et al., 2015; Peng, 2014; Seo et al., 2007).

En los últimos años, se ha experimentado un crecimiento en el desarrollo de aplicaciones comerciales que incorporan instrumentos de evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Ejemplos de ellos lo suponen aplicaciones como Tally (KT Innovations and Autodesk, 2014), desarrollada para el entorno de trabajo de Revit (Autodesk) y adaptada al contexto de EEUU o OneClick LCA (Oneclick LCA, 2017), basada principalmente en el uso de EDPs para orientar la toma de decisiones desde las primeras etapas de diseño.

Por otro lado, se reconocen los desafíos metodológicos que supone la integración de herramientas BIM-ACV. Håkkinen and Kiviniemi (2008) por su parte, plantea como alternativa para la integración de ambas herramientas el desarrollo de un software separado del software BIM ya que podría ser más fácil de implementar y más amigable con el usuario. Al mismo tiempo, la interoperabilidad entre los diferentes softwares supone también otro importante desafío (Rahmani Asl et al., 2015). La forma más efectiva de llevar adelante la integración de ambas herramientas es otro de los desafíos identificados (Antón Álvarez and Díaz, 2014; Rist, 2011). Rist, (2011) subraya que la integración BIM-LCA es ventajosa siempre y cuando la cantidad de datos, el proceso de evaluación y

los resultados sean amigables con el usuario y faciliten la aplicación del ACV.

En el siguiente apartado recogen algunos de los principales casos de estudio que incorporan ambas herramientas durante el proceso de diseño de los edificios.

### **2.2.1 Breve análisis de casos de estudio que integran herramientas BIM a la metodología ACV**

El estudio de casos (Tabla 3) ha incluido once artículos científicos publicados durante los últimos cinco años, los cuales desarrollan la integración de modelos BIM en el proceso de cálculo de los impactos ambientales basados en la metodología de ACV.

El análisis desarrollado busca identificar en qué medida la integración de ambas herramientas ha ayudado a reducir esfuerzos de cara a la apli-

cación de la metodología de ACV durante la fase de diseño de edificio. Dada la escasa cantidad de estudios identificados en las siguientes fuentes bibliográficas del ámbito científico (incluyendo Web of Science, American Society of Civil Engineers, Emerald, Mendeley, SageJournals, ScienceDirect, Scopus, Springer Link, Taylor and Francis, Wiley Online Library, y Google Scholar), los trabajos analizados incluyen además de las tipologías residenciales (vivienda colectiva y unifamiliar), tipologías de oficinas y educativas.

El estudio de casos se ha centrado en discutir los aspectos metodológicos de la integración de ambas herramientas, así como también en determinar en qué medida el uso del BIM puede ayudar a reducir los esfuerzos y simplificar la aplicación del ACV. Por otra parte, también se persigue determinar como el ACV puede ayudar a optimizar las prestaciones de los softwares BIM de cara a mejorar la calidad ambiental de los edificios durante la fase de diseño.

**Tabla 3.** Casos de estudio seleccionados para análisis de estrategias de integración BIM-ACV.

(Fuente: elaboración propia)

Referencia	País	Tipología edilicia
Ajayi et al., 2015	EEUU	Escuela primaria de 2 plantas
Basbagill et al., 2013	EEUU	Vivienda colectiva
Georges et al., 2014	Noruega	Vivienda unifamiliar y edificio de oficinas
Houlihan Wiberg et al., 2014	Noruega	Vivienda unifamiliar
Iddon and Firth, 2013	Reino Unido	Vivienda unifamiliar
Jalaei and Jrade, 2014	Canadá	Edificio de oficinas de 3 plantas
Jrade and Jalaei, 2013	Canadá	Vivienda colectiva de 6 plantas
Lee et al., 2015	Corea del Sur	Vivienda colectiva de 18 plantas
Peng, 2014	China	Edificio de oficinas 16 plantas
Shafiq et al., 2015	Malasia	Edificio de oficinas de 2 plantas
Shin and Cho, 2015	Malasia	Edificio de oficinas de 11 plantas

### 2.2.2 Estrategias de integración BIM-ACV

En líneas generales el estudio de casos ha podido confirmar que las mayores potencialidades sobre el uso de herramientas BIM y su integración en la aplicación del ACV, son la posibilidad de listar los elementos que componen el edificio y facilitar el cruzamiento de esos datos del edificio con bases de datos externas sobre el comportamiento ambiental de los materiales.

Por otra parte, está claro que la información contenida en los softwares BIM, referida a bases de datos sobre materiales y componentes resulta limitada para llevar adelante el procedimiento de aplicación del ACV.

A través del análisis de los casos de estudio ha sido posible detectar tres niveles en la integra-

ción de ambas herramientas, el primero persigue el uso de las herramientas BIM para obtener los listados ordenados de materiales y componentes del edificio, y sus cuantías correspondientes. El segundo nivel además de utilizar las herramientas BIM para organizar y cuantificar materiales y componentes incorpora bases de datos ambientales al entorno BIM o a otro vinculado a él. El tercer nivel de integración persigue el desarrollo de herramientas automáticas o semi-automáticas que puedan vincular información sobre los materiales que componen el edificio y la información ambiental sobre los procesos que se producen durante su ciclo de vida.

Estos niveles de integración se corresponden con el desarrollo concreto de estrategias, las cuales se basan principalmente en:

- El uso de plantillas en herramientas BIM vinculadas a bases de datos ambientales de materiales, tales como emisiones de CO<sub>2</sub>, las cuales sólo permiten aproximarse a los impactos en etapa de producto, detectado en (Lee et al., 2015).

- El uso de plug-ins adaptados a un entorno BIM específico, los cuales permiten estimar algunos de los impactos producidos en fase de producto, pudiendo ser de utilidad durante las fases preliminares de selección de materiales, verificada en Jalaei and Jade (2014).

- El uso de herramientas BIM vinculadas a otros entornos de simulación tales como el del cálculo de la demanda energética, posibilita obtener una serie limitada de indicadores y durante un limitado número de fases del ciclo de vida del edificio.

- La interacción de varias herramientas BIM para obtener datos cualitativos sobre los materiales utilizados, los impactos ambientales y vinculadas a herramientas para el cálculo del ACV.

### 2.2.2.1 Principales desafíos identificados

A los efectos de definir los puntos de partida sobre los cuales se cimentará la propuesta metodológica que se desarrollará, se identifican los principales desafíos.

A nivel operativo, se plantea la necesidad de semi-automatizar o automatizar los procedimientos de cruzamiento y relación de datos entre los entornos de modelado BIM y los entornos de aplicación del ACV. En este sentido, uno de los grandes desafíos es automatizar los procesos de: modelado, listado de materiales, asignación de productos y materiales auxiliares, asignación de distancias y recorridos a materiales y componentes, cálculo de residuos, asignación de procesos unitarios y flujos energéticos, entre otros. Por otra parte, este flujo de datos requiere que sea lo más sencillo y amigable con el usuario, para que pueda ser aplicado por técnicos y diseñadores desde las primeras fases de diseño del edificio.

A nivel metodológico, se deberá atender al cumplimiento de las normas de referencia (EN 15978 (EN, 2011) y EN 15804 (EN, 2012a)), justificando debidamente las hipótesis y procedimientos asumidos.



### 2.3 Propuestas de metodología ACV simplificada aplicada a edificios de tipo residencial (Artículo III)

Este apartado constituye el núcleo fundamental de la presente Tesis, dado que se aproxima a la propuesta metodológica de la herramienta que integra herramientas BIM a la aplicación del ACV. A partir del estudio de los antecedentes relevantes sobre las estrategias de simplificaciones aplicadas al ACV y de estrategias de integración de ambas herramientas anteriormente expuestas, se definen algunas de las principales características de la metodología.

Primeramente, se busca que la metodología desarrollada permita establecer un “puente” entre ambas herramientas, posibilitando la incorporación de forma semi-automática de datos sobre el edificio, sus características constructivas, complementar datos sobre materiales, materiales auxiliares utilizados, procesos de producción y de construcción durante todo su ciclo de vida.

Por otra parte, se busca que pueda ser utilizada desde la fase de diseño del edificio y que pueda otorgar información representativa sobre el contexto en el que se emplaza el edificio. El nivel de desarrollo (LOD) del modelo BIM será de 300, dado que de acuerdo con lo definido por la AIA (AIA, 2013), permite definir los elementos constructivos fundamentales, tales como espesores y capas de materiales en un nivel adecuado, posibilitando la selección de materiales y elementos constructivos.

La metodología desarrollada posibilita la evaluación del modelo de un edificio vinculando de forma automática el modelo BIM con la herramienta de cálculo de los impactos, fuera del entorno BIM. Esto se debe a dos razones fundamentales, la primera es que se pretende que esta metodología pueda ser válida para cualquier herramienta BIM, de forma que posibilite la interoperabilidad entre los diferentes softwares. Por otra parte, se busca que el modelo pueda ajustar o modificar su geometría en el entorno de trabajo BIM, es decir que si existen variaciones en los espesores de algún material que se quiera comparar, el usuario pueda ajustar la geometría del edificio en el modelo BIM en el software BIM que lo ha diseñado.

Por otra parte se busca que la metodología desarrollada se ajuste lo más posible a las normas de referencia EN 15978 (EN, 2011) y la EN 15804 (EN, 2012a), persiguiendo justificar debidamente las estrategias de simplificación aplicadas a la metodología del ACV.

En última instancia se busca establecer un instrumento de trabajo que resulte sencillo para el usuario, y que pueda ser utilizado para comparar por ejemplo diferentes materiales o sistemas constructivos utilizados en una misma vivienda, o también para comparar mismas unidades de referencias en diferentes tipologías edilicias.

### 2.3.1 Descripción de la metodología propuesta

La metodología propuesta parte de entender que los sobre los materiales que componen el edificio incluidos en el software BIM, son insuficientes, especialmente durante los procesos de producción en la obra, fase de uso y fin del ciclo de vida. Para corregir esta situación, se propone complementar estos datos mediante la definición de una estructura que posibilite su flujo automático, su manipulación por parte del usuario y la adaptación de los mismos a un contexto determinado.

Se parte de definir las fases en las que se centrará la aplicación de la metodología propuesta, las cuales se ajustan al proceso de diseño y modelado de los edificios en el entorno BIM. La metodología propuesta asume que el flujo de datos se producirá fuera del software BIM, pero vinculando de forma automática su contenido a una estructura de datos auxiliar.

Se definen 4 fases de aplicación que se indican en la Figura 4 y se describen en profundidad en el apartado 2.3.3. La primera fase constituye la definición del Template o Plantilla (T), donde se definen los elementos constructivos y materiales que compondrán el modelo. La segunda fase (Supplementary data phase) busca enriquecer la información sobre el modelo a partir de vincular los datos existentes con la biblioteca de materiales BIM, la cual complementa la información sobre el edificio de cara a la aplicación del ACV. La fase de análisis (Analysis phase) tiene como objetivo reorganizar la información derivada de la fase anterior y llevar adelante el cálculo de las categorías de impacto ambiental seleccionadas. En la fase de resultados (Results phase) se presentan los resultados de forma clara y concisa, ayudando al usuario en la

toma de decisiones durante el proceso de diseño. La estructura de datos propuesta incluye los siguientes elementos que se organizan de acuerdo con la Figura 4:

- **Modelo BIM** (BIM model). El modelo BIM, constituye el punto de partida de la metodología propuesta. Este consiste en el modelo virtual del edificio, el cual ha sido construido de acuerdo con la plantilla (T) y contiene todos los componentes BIM (BC) y materiales BIM (BM) que formarán parte del proceso de evaluación.

- **Componentes BIM** (BIM Components (BC)). Los componentes BIM son elementos que contribuyen en la estructuración de datos sobre los materiales en el software BIM. Estos componentes constituyen una base gráfica y de datos asociados que contienen las principales características de los materiales que componen el modelo. Cada componente contiene datos sobre las capas y espesores de los materiales que lo componen.

- **Materiales BIM** (BIM materials). Los materiales BIM son los elementos que estructuran el flujo de datos que se produce entre el modelo BIM (Cuantificación de materiales inicial) y la biblioteca de materiales, donde se complementan los datos sobre las características de los materiales.

- **Cuantificación inicial de materiales** (Bill of material quantities. Initial). Constituye el elemento de salida de datos desde el modelo BIM, y contiene el listado de los materiales BIM que se encuentran en el modelo y la cuantificación de su presencia en el modelo, expresada en varias magnitudes (volumen, superficie y peso).



**-Biblioteca de materiales BIM** (Library of BIM Materials). Esta biblioteca está estructurada de acuerdo con los materiales BIM y tiene como función la de enriquecer y complementar los datos sobre los materiales para ser utilizados en la aplicación del ACV. Esta biblioteca se compone de fichas de materiales (ver ficha tipo en Tabla 4) e incorpora datos sobre materiales auxiliares que se utilizan durante el proceso de construcción, materiales que se utilizan durante la fase de mantenimiento, los tipos de envases y su cuantificación, porcentajes de residuos producidos (durante fase del ACV), distancias y medios de transporte utilizados para desplazar los materiales a la obra. Al mismo tiempo organiza los materiales que se incorporan según su naturaleza de fabricación y de acuerdo con “Materiales Básicos” (*Basic materials*) y la fase del ciclo de vida en la que se incorporan.

**-Cuantificación final de materiales.** (Bill of material quantities. Final). Esta lista contiene el resumen de materiales que intervienen durante el ciclo de vida del edificio organizado de acuerdo con los “**Materiales Básicos**”.

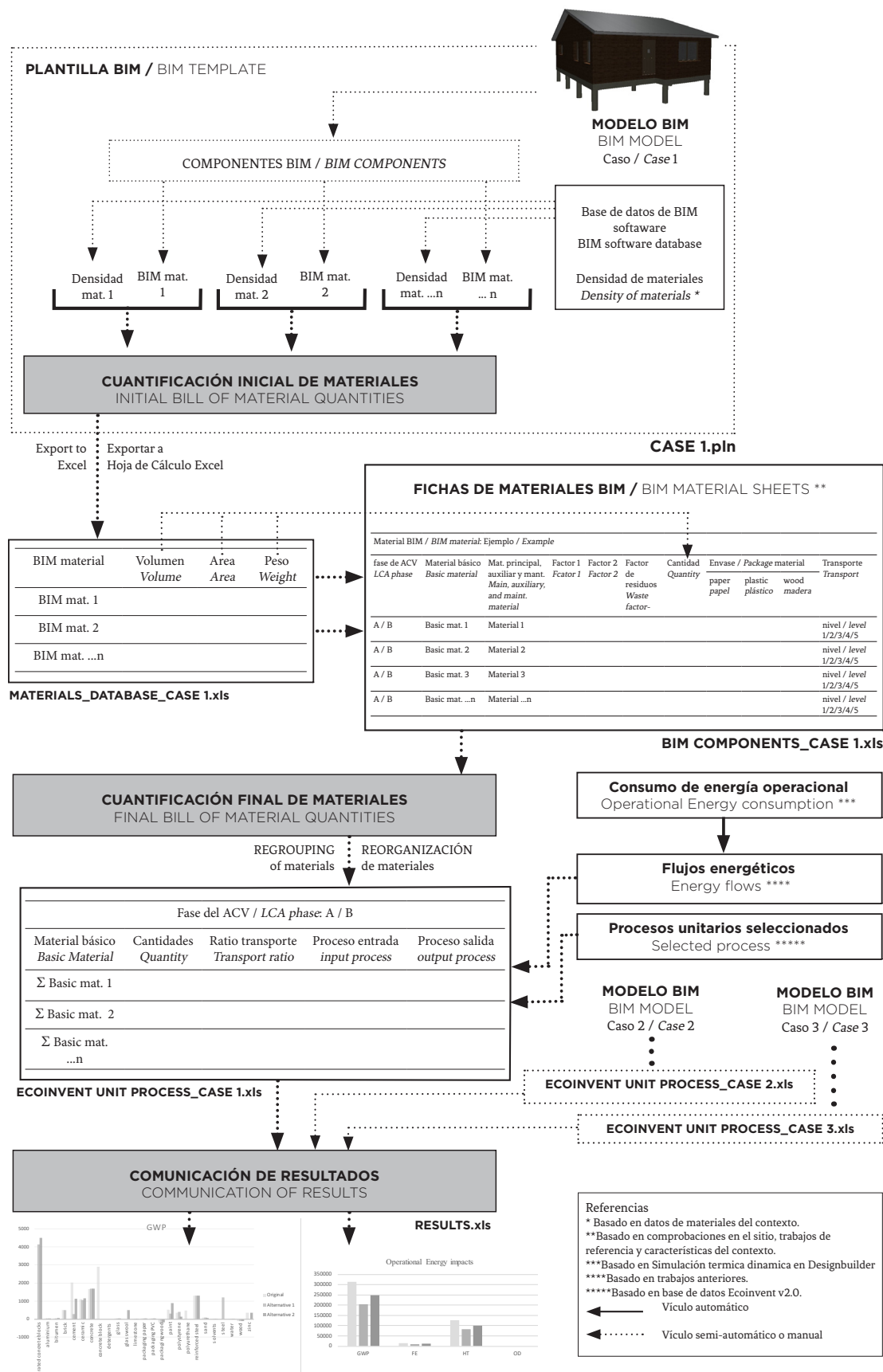
**-Lista de Materiales Básicos.** (List of Basic materials). Los “Materiales Básicos” son los criterios de organización de los materiales que componen el edificio que tienen en cuenta su naturaleza de fabricación, constituye una simplificación que ayuda a identificar los procesos unitarios más relevantes que intervienen durante el ciclo de vida del edificio.

**-Lista de procesos unitarios** (List of process) : De acuerdo con la norma ISO 14040 (ISO, 2006a) un proceso unitario es el “Elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida”. El listado de los procesos unitarios que intervienen, parte de relacionar los “**Materiales Básicos**” con los escenarios del ciclo de vida que se le ha asignado a cada material. Se podrá asignar a cada **material básico** un proceso unitario que permita determinar los impactos producidos durante la fabricación, procesos de transformación intermedia (si los hay) y su disposición final en la fase del ciclo de vida que corresponda.

**-Cálculo de categorías de impacto.** (Environmental Impact Calculation). Para el cálculo de los impactos ambientales se ha utilizado la base de datos Ecoinvent v2.0 (Ecoinvent Centre, 2007). Para la caracterización de los impactos ambientales se elige el método de cálculo más adecuado, que permita obtener datos sobre las categorías de impacto seleccionadas.

**-Comunicación de resultados.** (Communication of results). Los resultados obtenidos se muestran de forma sencilla y clara, con el objetivo de poder ser una herramienta para orientar al técnico durante el proceso de diseño, sobre todo de cara a la elección de componentes, materiales, sus espesores, y su conformación.

### 2.3.2 Esquema de interacción de herramientas y recursos utilizados



**Figura 6** Esquema de interacción de herramientas y recursos. (Fuente: elaboración propia)

**Análisis del Ciclo de Vida de edificios residenciales.** Propuesta metodológica para el diseño de una herramienta simplificada.



### 2.3.3 Propuesta de procedimiento de aplicación

La metodología propuesta parte de utilizar varios softwares para llevar adelante el proceso de aplicación del ACV. Para el desarrollo del modelo BIM del edificio se utiliza ArchiCAD 19 (GRAPHISOFT, 2017), para el manejo de datos numéricos y su procesamiento se utiliza Microsoft Office Excel® (Microsoft, 2016) y para la simulación térmica dinámica del edificio se utiliza DesignBuilder 4.7.0.027 (Cockcroft, 2016).

En la Figura 5 se representa la interacción de las herramientas y los recursos utilizados durante la aplicación de la metodología. En este esquema se muestra la interacción de los archivos que se desarrollan y su contenido, también se muestran las fuentes de datos en las que se ha basado la elaboración de hipótesis para la aplicación del ACV.

La metodología consta de cuatro fases fundamentales, las cuales definen el orden del procedimiento de aplicación. La primera fase, previa al modelado del edificio, es la definición de la plantilla de trabajo o *Template*. En esta fase se organiza el entorno de trabajo en el software BIM, se definen y etiquetan debidamente todos los materiales y componentes con los que se va a trabajar. Al final de esta fase se obtiene la “Cuantificación inicial de materiales” o *Initial bill of material quantities*.

La segunda fase constituye la asignación de los datos complementarios sobre los materiales BIM, residuos producidos, materiales y productos auxiliares, utilizados tanto en fase de producción, uso y deconstrucción. El procedimiento se realiza mediante las fichas de materiales BIM (que contiene la información descrita en la Tabla 4). La vinculación entre la lista de *Initial bill of mate-*

*rial quantities* y las fichas se establece de forma automática, pero es siempre modificable por el usuario.

Estas bibliotecas se organizan a partir de los materiales BIM definidos en la plantilla (T), de ratios y porcentajes que ajustan los datos complementarios al contexto de referencia, enriqueciendo la información obtenida a partir del modelo BIM. La creación de estas bibliotecas permite fácilmente vincular estos materiales BIM con otros datos relevantes sobre el edificio durante su ciclo de vida. Estas fichas sirven de vínculo o nexo entre el modelo BIM y el cálculo de los impactos ambientales.

Cada ficha de un material BIM contiene la información indicada en la Tabla 4, la cual se organiza de la siguiente forma:

**Fase del ciclo de vida:** Indica la fase del ciclo de vida en la que se incorpora el material al sistema, pudiendo ser A (fase de producción y construcción) o B (fase de uso).

**Material básico:** Se trata del material más representativo, contenido en el material principal, material auxiliar, etc. Constituye una simplificación que busca clasificar los materiales de acuerdo con su naturaleza de fabricación.

**Material principal, auxiliar, de mantenimiento, reposición, sustitución, rehabilitación:** Corresponde al nombre del material que se incorpora durante las fases de producción, construcción y uso.

**Tabla 4.** Ficha tipo de material. (Fuente: elaboración propia)

Fase ACV <i>LCA phase</i>	Material básico <i>Basic material</i>	<i>Main, auxiliary, and mainte- nance material</i>	Factor 1	Factor 2	Factor de residuos <i>Waste factor</i>	Cantidad <i>Quantity</i>	Materiales de envase o embalaje <i>Package material</i>			Transporte <i>Transport</i>
							Papel <i>Paper</i>	Plástico <i>Plastic</i>	Madera <i>Wood</i>	
A/ B	Basic mat. 1	Mat. 1	-	-	-	-	-	-	-	Nivel / level 1/ 2 /3 /4 /5
A/ B	Basic mat. 2	Mat. 2	-	-	-	-	-	-	-	Nivel / level 1/ 2 /3 /4 /5
A/ B	Basic mat. 3	Mat. 3	-	-	-	-	-	-	-	Nivel / level 1/ 2 /3 /4 /5
A/ B	Basic mat. 4	Mat. 4	-	-	-	-	-	-	-	Nivel / level 1/ 2 /3 /4 /5

**Factor 1:** Corresponde al factor o coeficiente en el que se encuentra un material con respecto a la cantidad total del material BIM (ej. para el “material BIM ladrillo” este factor ayuda a obtener por separado la cantidad de mortero y de ladrillo propiamente dicho).

**Factor 2:** Corresponde al factor o coeficiente en el que se encuentra un material con respecto a otro. (ej. para el caso de morteros este factor ayuda a obtener por separado la cantidad de arena, cemento, cal y agua).

**Factor de residuos:** Se trata del factor de residuos producidos durante la fase de construcción o uso.

**Cantidad:** Indica la cantidad total de material luego de aplicar el Factor 1 y Factor 2, según la unidad de medida en la que se cuantifican los impactos para ese Material Básico en la base de datos utilizada.

**Materiales de envases:** Indica el ratio por unidad de material que se ha utilizado en el envasado, este ratio se multiplica por la cantidad de material para obtener los totales. Este dato se basa en constataciones en el sitio y datos sobre los fabricantes de los materiales. Se ha establecido una simplificación basada en García-Martínez (2010) de los posibles materiales utilizados en el envasado de productos de la construcción, siendo los más frecuentes el papel y cartón, plástico (PVC) y madera (pallets).

**Transporte:** Se han establecido 5 niveles posibles, adaptados a la características del contexto de referencia, los cuales se definen en el apartado 2.3.3.3.4.

Las cantidades de los materiales están vinculadas automáticamente a los ficheros que contienen la cuantificación automática proveniente del software BIM, de modo que cualquier alteración en los espesores de los materiales BIM, dimensiones de los elementos constructivos o geometría del

edificio puede modificar automáticamente los resultados.

Luego de la fase de información complementaria se desarrolla la fase de análisis, en la cual se parte de reorganizar los datos obtenidos en la fase anterior. El análisis consiste en reagrupar los materiales BIM de acuerdo con los materiales básicos utilizados. Estos se organizan de acuerdo con la fase del ciclo de vida en la que se incorporan. Por otra parte, también se incluye la asignación de los procesos unitarios que intervendrán en la fase de cálculo de los impactos. A cada material básico se le asigna un proceso unitario de entrada y de salida, a los efectos de obtener los impactos que se producen durante el proceso de fabricación y procesamiento de los productos y materiales, así como también los impactos que se producen en la disposición final de éstos.

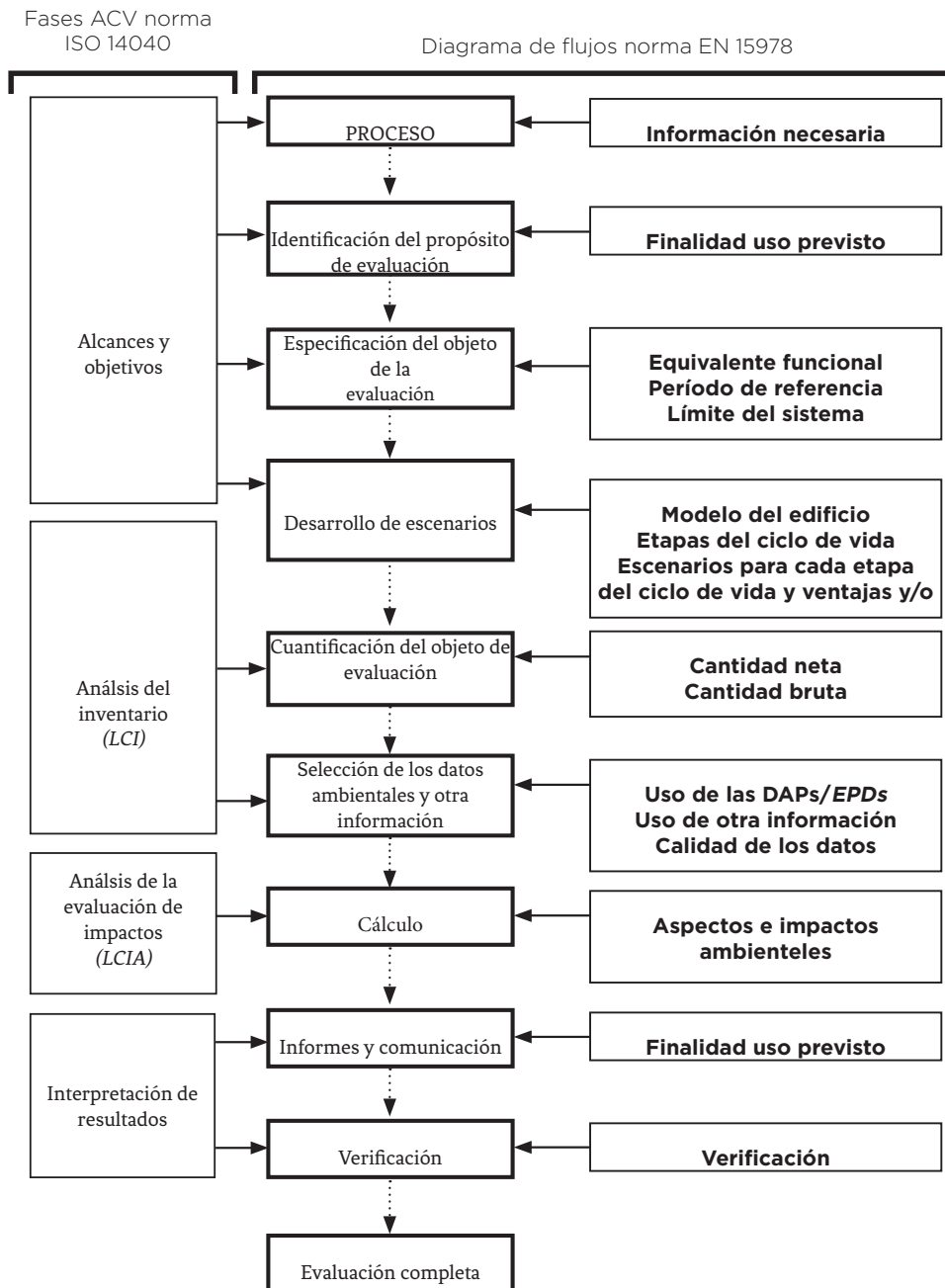
La elección de los procesos unitarios se realiza además en función de los escenarios del ciclo de vida que se han elegido para cada fase y para cada material en particular, es decir se deberá tener en cuenta si la materia prima de procesamiento proviene del primer uso o si ha sido reciclado, así como también tendrá que tenerse en cuenta si en fase de uso o fin de vida el material removido será trasladado a vertedero, o será tratado para su reciclado y posteriormente su nuevo uso.

La fase de análisis también incluye la cuantificación de los flujos de energía durante las fases de construcción y deconstrucción, la cual se realiza a partir de datos de referencia obtenidos sobre tipologías de referencias construidas en el contexto a considerar. De no ser posible la obtención de estos datos, la metodología propuesta prevé la utilización, de acuerdo con lo establecido por

García-Martínez (2010), de los ratios de referencia aplicados por Kellenberger et al. (2004) para el cálculo del consumo energético en función del volumen de material utilizado, que se detalla en el apartado 2.4.2 *Elaboración del inventario de ACV*. La cuantificación de los impactos producidos por el consumo de energía en fase de uso, se realiza mediante la simulación dinámica del comportamiento térmico del edificio. Este procedimiento se realiza mediante la utilización del software DesignBuilder 4.7.0.027 (Cockcroft, 2016), el cual permite obtener resultados fiables sobre el desempeño térmico del edificio durante su ciclo de vida. El dato obtenido sobre el consumo energético anual es incluido de forma manual en el esquema de cálculo del flujo energético donde se incorporan los porcentajes de producción de energía primaria según la fuente de producción y de acuerdo con datos recientes sobre el mix energético del contexto de referencia.

Finalmente, la fase de resultados busca que la comunicación de éstos se adapte al procedimiento de diseño que se desarrolla en el software BIM. De modo que los resultados obtenidos se representan gráficamente de forma clara y concisa, para que el usuario puede reconocer fácilmente los impactos producidos en cada fase del ciclo de vida por cada material y componente BIM.

La estructura de información que se aporta, se organiza de acuerdo con lo establecido por la norma EN 15978 (EN, 2011) para el flujo de procesos de evaluación del comportamiento ambiental del edificio. Esa información se vincula con las fases del ACV establecidas por la norma ISO 14040 (ISO, 2006a) en base a la cual se estructura el flujo de información para la aplicación del ACV a nivel genérico, según se muestra en la Figura 7.



**Figura 7** Esquema del diagrama de flujo del proceso de evaluación del comportamiento ambiental de los edificios (Fuente: elaboración propia basado en EN 15978 y en ISO 14040).

### 2.3.3.1 Definición de equivalente funcional

El objeto de la evaluación será el modelo definido en el software BIM, en la primera fase de aplicación de la metodología, y podrá ser el edificio completo o una parte o sistema de él (ej. sistema envolvente, sistema estructural, una habitación). Desde el punto de vista operativo el equivalente funcional está dado por el contenido de información que se incorpora en el modelo BIM, es decir todos los elementos que estén correctamente modelados e identificados formarán parte del equivalente funcional que se somete el proceso de aplicación del ACV.

Hay que tener en cuenta que si se desea comparar diferentes modelos (variantes materiales, geométricas o constructivas) se deberá establecer claramente las condiciones de la comparación del equivalente funcional (EN, 2011). En el caso que se entienda apropiado se puede utilizar como base de comparación, para los casos cuyo equivalente funcional sea diferente, una unidad de referencia común (EN, 2011).

De acuerdo con lo establecido por la norma EN 15978 (EN, 2011), para llevar adelante la evaluación del edificio de forma completa, se deberá disponer de un modelo *as built* es decir con el mayor grado de detalle (LOD 500) posible y respetando el edificio tal y como se ha construido. Dado que esta metodología busca ser aplicada en la fase de diseño del edificio, y busca evaluar hipótesis previas a la construcción del edificio, se aplicará a un modelo BIM de LOD 300. Entendiendo a este como el escenario óptimo para asegurar la comprobación del comportamiento ambiental de los materiales y componentes en la fase de diseño. Este nivel de detalle permite obtener datos sobre los materiales, sus espesores, y dimensiones, asumiéndose un margen de variabilidad aceptable en relación al edificio real.



### 2.3.3.2 Definición del límite del sistema

De acuerdo con lo establecido por la norma ISO 14040 (ISO, 2006a) el límite del sistema está dado por el “conjunto de criterios que especifican cuales de los procesos unitarios son parte del sistema del producto”.

Para la adaptación de la aplicación del ACV en edificios la norma EN 15978 (EN, 2011) establece el “principio de modularidad” (ver Figura 2, Capítulo 1) donde se definen los módulos de información los cuales desde el A1 al C4 cubren “los impactos y aspectos ambientales vinculados a procesos y operaciones que están contenidos dentro del límite del sistema edificio”. Por su parte el módulo D, incluye los beneficios ambientales que tienen lugar más allá del límite del sistema.

La norma EN 15978 (EN, 2011) también aclara que los procesos que afectan al comportamiento ambiental del edificio durante su ciclo de vida deben estar asignados al módulo en el que se produzcan, es decir que por ejemplo los impactos derivados de la sustitución de algún material durante la fase de uso, deben incluir la producción del material nuevo, su transporte, el uso de materiales auxiliares (si corresponde), los residuos de envases o embalajes y la disposición final del material removido (si corresponde).

La metodología diseñada incorpora aquellos procesos que influyen directamente en la fase de diseño y especialmente dentro de los parámetros y variables que se pueden controlar en el entorno BIM y las bibliotecas complementarias de materiales BIM.

Para la fase de producto (A1-A3) la norma EN 15978 (EN, 2011) establece que se debe cumplir lo establecido en la norma EN 15804 (EN, 2012a), ya que se trata de la referencia normativa sobre la definición de reglas de categoría de productos (PCR) para todos los productos y servicios de construcción. Esta también constituye la referencia normativa a la hora de desarrollar Declaraciones Ambientales de Productos (DAP /EPD) de productos de construcción, servicios de construcción y procesos de construcción. Esta norma define que el límite del sistema para estos módulos de información (A1-A3), “se establece para incluir aquellos procesos que proporcionan las entradas de material y energía en el sistema y los procesos posteriores de fabricación y transporte hasta la puerta de la fábrica, así como el tratamiento de los residuos generados por dicho proceso”.

La metodología desarrollada considera los procesos de fabricación de los materiales asumiendo los flujos de mayores impactos dentro de dichos procesos.

Para el módulo de transporte (A4) la norma EN 15978 (EN, 2011) estipula que se debe considerar el transporte de los materiales desde la puerta de la fábrica a la obra (cuna a la puerta o *cradle-to-site*), incluyendo cualquier almacenamiento intermedio y distribución. Se considera también el transporte de los equipos de construcción hacia y desde la obra. También deben ser incluidos los impactos y aspectos relacionados con pérdidas debidas al transporte y no se deben incluir el transporte de personas hacia y desde la obra.

Por su parte, el presente trabajo ha considerado la fase de transporte, para reducir esfuerzos en la obtención de datos e información, se ha modelizado el comportamiento de acuerdo con ciertos patrones de comportamiento detectados en el contexto que se aplicará la metodología. Dicha hipótesis de trabajo se detalla en los apartados 2.3.3.3.4 Escenarios para asignación de transporte y 2.4.2. Elaboración del inventario de ACV.

Para la fase de construcción (A5) la norma EN 15978 (EN, 2011) prevé la incorporación de los “procesos de obras sobre el terreno y mejoras en el paisaje”; el “almacenamiento de los productos”; el “suministro de calefacción, refrigeración y humectación”; el “transporte de los materiales, productos, residuos y equipos en la obra”; “las obras temporales, incluyendo emplazadas fuera de la obra que sean necesarias para los procesos de instalación en construcción”; “la producción y transformación de un producto en la obra; la instalación de productos del edificio incluyendo materiales auxiliares no contabilizados en la DAP de los productos”; el uso de agua para refrigeración o limpieza en la obra; la gestión de los residuos, materiales y productos perdidos durante el proceso de construcción.

La metodología desarrollada incorpora durante esta fase (A5), los “procesos de obras sobre el terreno”, tales como movimientos de tierra o excavaciones, asumidos a través del uso de maquinaria especializada para la realización de esas tareas. Los trabajos de “almacenamiento de los productos”, “la producción y transformación de un producto”, “el transporte de los materiales, productos, residuos y equipos” son también asumidos como derivados de la utilización de maquinaria especia-

lizada. Dependiendo de las características climáticas de la localización, las dimensiones y el tipo de obra se incluye el “suministro de calefacción, refrigeración y humectación”, así como el “uso de agua para refrigeración y limpieza”, como parte del consumo energético y de agua derivado del proceso de construcción. Se ha incluido también el uso de materiales auxiliares, en aquellos casos donde correspondiera. Asimismo, se han incluido los procesos de gestión de residuos hasta su fin de vida.

Para la fase de uso (B1) la norma EN 15978 (EN, 2011) contempla la incorporación de “impactos vinculados a las condiciones normales de uso de los materiales”, tales como las “emisiones derivadas del uso de algunos materiales”.

El módulo referido a la fase de uso de los materiales, no es incluido dado que hace referencia a patrones derivados del uso del edificio, características del contexto y los materiales utilizados, de las que se carece de fuentes fiables de información que permitan asignar los impactos derivados correspondientes.

En la fase de mantenimiento (B2) la norma EN 15978 (EN, 2011) prevé incluir “la producción y el transporte de todos los materiales y productos auxiliares utilizados para el mantenimiento”, se prevé también la incorporación de todos los “procesos de limpieza tanto interior como exterior” y por último los trabajos de mantenimiento prevén el “mantenimiento del comportamiento tanto funcional como estético del edificio”.

Para esta fase (B2) la metodología desarrollada incluye, para aquellos materiales y componen-

tes que lo requieran, la producción y transporte de los materiales auxiliares utilizados durante los trabajos de mantenimiento, los procesos de limpieza, y los productos y trabajos derivados del mantenimiento tanto funcional como estético del edificio.

Para el módulo de reparación (B3) la norma EN 15978 (EN, 2011) incluye la “producción de productos o componentes reparados y los productos auxiliares”; “transporte de las partes o componentes reparados y de los productos auxiliares, incluyendo los impactos y aspectos de la producción de materiales perdidos durante el transporte”; “procesos de reparación de las partes o componentes reparados y los productos auxiliares”; la “gestión de los residuos” y las “etapas de fin de vida” de esos elementos.

Durante la etapa de sustitución (B4) se prevé incluir “la producción de los componentes sustituidos y de los productos auxiliares; el transporte de los componentes sustituidos y de los auxiliares; el transporte de los componentes sustituidos y de los productos auxiliares, los impactos de los aspectos de la producción de los materiales perdidos durante el transporte; la gestión de los residuos de los componentes eliminados y de los productos auxiliares; la etapa de fin de ciclo de vida de los componentes eliminados y de los productos auxiliares” EN 15978 (EN, 2011).

Durante la etapa de rehabilitación (B5) la norma EN 15978 (EN, 2011) prevé incluir la “producción de los componentes nuevos del edificio, el transporte de los componentes nuevos del edificio (incluyendo la producción de materiales perdidos durante la rehabilitación), la gestión de los proce-

sos de rehabilitación y la etapa de fin de vida de los componentes sustituidos del edificio”.

Al igual que en la fase de mantenimiento (B2) para las fases de reparación (B3), sustitución (B4) y rehabilitación (B5), la metodología desarrollada prevé incluir para aquellos materiales que lo requieran, la totalidad de los impactos derivados de producción, transporte, procesos de reparación, gestión de residuos y etapas de fin de ciclo de vida de todos los materiales utilizados durante estas fases.

El límite para el uso de la energía (B6) la norma EN 15978 (EN, 2011) prevé que se incluya la “energía real o calculada utilizada anualmente para cubrir las necesidades de uso de edificio, derivadas de la calefacción, suministro de agua caliente, aire acondicionado, ventilación, iluminación y energía auxiliar utilizada”.

La metodología diseñada prevé la incorporación del uso de energía en servicio teniendo en cuenta las necesidades de calefacción, refrigeración, ventilación, iluminación suministro de agua caliente y suministro de energía auxiliar (si corresponde), se prevé dependiendo de los objetivos de la evaluación y el alcance de los resultados la reducción justificada de alguna de estas necesidades.

Para el módulo referente al uso de agua en fase de servicio (B7) la norma EN 15978 (EN, 2011) prevé incluir todos los “procesos integrados en el edificio que consumen agua, tales como el agua potable, el agua sanitaria, el agua caliente sanitaria, el riego de zonas ajardinadas”, “el agua destinada para calefacción”, u otros usos.

Dado que la fase de uso de agua en servicio, no se encuentra vinculada directamente a parámetros que puedan ser determinados durante las fases de diseño en el entorno de trabajo BIM, se entiende que esta fase no tiene incidencia directa durante el diseño del edificio, dado que responde a parámetros de consumo de los usuarios de edificio. En este sentido, sólo se contabilizará el consumo de agua derivado de los trabajos de construcción, mantenimiento y limpieza de los materiales y componentes del edificio.

Para el módulo de deconstrucción (C1) la norma EN 15978 (EN, 2011) define como límites del proceso a las operaciones en la parcela y fuera de ella, que sean necesarias para dejar al edificio fuera de servicio y que incluyen la deconstrucción y el desmantelamiento.

Durante esta etapa la metodología desarrollada prevé la incorporación de los procesos que incluyen el desmantelamiento y la deconstrucción del edificio.

El límite para el módulo de transporte (C2) de acuerdo con lo establecido por la norma debe incluir todos los impactos debidos al transporte al vertedero hasta el fin de residuo, incluyendo posibles emplazamientos intermedios de almacenamiento.

La metodología propuesta asume también la inclusión de los impactos derivados del transporte de los materiales desmantelados hasta el vertedero, asumiendo a este como el fin último de estos materiales.

Para la fase de tratamiento, reutilización, recuperación o reciclaje (C3) debe considerar el tratamiento de los residuos previo a su reutilización o reciclaje. Para la fase de vertido (C4) la norma prevé incluir las “cargas producidas por el vertido final de los materiales”.

Para esta fase la metodología desarrollada prevé la incorporación de los impactos derivados del tratamiento de los residuos, siempre y cuando existan condiciones en el contexto que permitan el desarrollo de esta actividad. Se prevé también incluir los impactos derivados del vertido final de los materiales.

El módulo de beneficios ambientales (D) “cuantifica los beneficios y cargas ambientales netos obtenidos de la reutilización, reciclaje y valorización energética de los flujos netos de materiales exportados que salen del sistema”.

La metodología desarrollada no prevé la cuantificación de los beneficios y cargas ambientales más allá de los límites del sistema.

### 2.3.3.3 Definición de escenarios del ciclo de vida

De acuerdo con lo establecido por la norma EN 15978 (EN, 2011) es preciso que para llevar adelante la evaluación, se realice una descripción de las actividades físicas del edificio relacionadas con el tiempo. Para ellos se elaboran los escenarios, los cuales representan las hipótesis que se aplican a los modelos. Para esto se asume como documentos de referencia EebGuide (EeB Guide Project, 2012) y LoRe-LCA (SINTEF Building and Infrastructure et al., 2011).

La metodología desarrollada propone ciertas generalidades para estos escenarios y luego cada aplicación en concreto será desarrollada siguiendo diferentes parámetros. En este caso en particular se elaboran las generalidades de los escenarios concretamente para el contexto en el que se emplazan los casos de estudio (Uruguay) y para una tipología de viviendas en concreto (vivienda unifamiliar) en la que se centran los casos de estudio. En este apartado se detallan algunas características asumidas para la definición de escenarios en los casos de estudio.

Para la elaboración de estos escenarios se ha basado principalmente en fuentes oficiales o trabajos científicos de relevancia en los cuales se busca predecir y modelar comportamientos frecuentes que se producen a lo largo del ciclo de vida de las tipologías edilicias del contexto de referencia.

La definición de escenarios tiene en cuenta la vida útil del edificio, el período de referencia en el que esta es asumida, así como también la vida útil de los elementos que componen el edificio. Basándose en trabajos anteriores sobre el tema, desarrollados en este contexto (Peluso, 2011) se asu-

men como período de referencia para la vida útil del edificio 60 años.

#### 2.3.3.3.1 Escenarios para la etapa de producto

Para la elaboración de los escenarios de la etapa de producto se tiene en cuenta los trabajos de extracción de materias primas y su procesamiento. También se incluyen el transporte de las materias primas al lugar de fabricación y el proceso de fabricación de cada uno de los productos. Por otra parte, se incluye la producción de los materiales utilizados para el embalaje y envases de materiales y componentes del edificio.

#### 2.3.3.3.2 Escenarios para la etapa de construcción

Los escenarios de la etapa de construcción incluyen las actividades de montaje y construcción desarrollados durante la fase de obra, incluyendo de esa manera los consumos de combustible y energía de las maquinarias utilizadas. Se incluyen todos aquellos procesos auxiliares que puedan ser imputables a los materiales BIM contenidos en el modelo BIM.

Este módulo incluye el desperdicio de productos durante la ejecución, los procesos de producción adicionales para compensar la pérdida y el tratamiento de residuos que se producen en esta etapa. Los impactos derivados del desperdicio de los productos y la disposición final de los residuos son imputados a esta fase.



**Tabla 5.** Hipótesis sobre los factores de reposición utilizados para la aplicación de la metodología en los casos de estudio. (Fuente: elaboración propia basado en Tavares (2006) y Pelufo (2011))

Material	Años	Factor
Estructura de acero para cubiertas	100	1.0
Estacas de madera	73	1.0
Paneles aislamientos	69	1.0
Muros cerámicos, morteros	100	1.0
Revoque exterior	60	1.0
Suelo de madera	50	1.2
Suelo cerámico	30	2.0
Pinturas exteriores	8	7.5
Pinturas de interiores	8	7.5
Paneles de madera	45	1.33
Impermeabilización	10	6.0
Pintura cubierta	11	5.45
Revoques	60	1.0
Suelo hormigón	100	1.0

### 2.3.3.3 Escenarios para la etapa de uso

Los escenarios de mantenimiento de los elementos que componen el edificio se han basado en considerar el desgaste natural de los materiales durante la fase de uso, descartando los que tengan que ver con el usuario y la utilización del edificio, dado que depende de factores muy particulares del caso de estudio y de la forma de uso que le brinde el usuario.

Para elaborar las hipótesis de mantenimiento se ha considerado un escenario que pueda asegurar una limpieza periódica de los elementos expuestos a la acumulación de partículas y al desgaste provocado por factores atmosféricos.

Para la elaboración de los escenarios de reposición, reparación, sustitución y rehabilitación

(Tabla 5) de los elementos que componen el edificio además de asumir como referencia las serie de normas ISO 15686 (ISO, 2012, 2011a, 2011b, 2008), se han utilizado datos basados en Tavares (2006) y utilizados también por Pelufo (2011) para ser aplicados en el contexto de referencia (Uruguay). El factor de reposición se elabora en base al período de referencia asumida para la vida útil (60 años).

### 2.3.3.3.4 Escenarios para asignación de transportes (A4, B2, B3, B4, B5, C2)

Para definir los escenarios referidos al transporte se ha desarrollado la siguiente hipótesis basada en la definición de un modelo que pueda facilitar el ingreso de los datos.

Fuentes oficiales demuestran que el principal punto de ingreso de materiales de construcción

**Tabla 6.** Definición de modelo de asignación de transportes (Fuente: elaboración propia)

Parámetro	Nivel 1 Local	Nivel 2 Regional	Nivel 3 Extra-regional	Nivel 4 Continental	Nivel 5 Intercontinental
Tipo de vehículo	Remolque de camión con carga de 16t, consumo diésel 38 lts cada 100km.	Remolque de camión con carga de 16t, consumo diésel 38 lts cada 100km.	Remolque de camión con carga de 16t, consumo diésel 38 lts cada 100km.	Remolque de camión con carga de 28t, consumo diésel 38 lts cada 100km.	Buque interoceánico
Distancia estimada (km)	50	250	600	1500	15000
Utilidad de la capacidad	100% de la capacidad del volumen 30% de los retornos vacíos (Lasvaux, 2010)	100% de la capacidad del volumen 30% de los retornos vacíos (Lasvaux, 2010)	100% de la capacidad del volumen 30% de los retornos vacíos (Lasvaux, 2010)	100% de la capacidad del volumen 30% de los retornos vacíos (Lasvaux, 2010)	
Factor de utilización de la capacidad	1	1	1	1	1

derivados de desplazamiento intercontinentales se produce a través del puerto de Montevideo (ANP, 2017).

El modelo desarrollado basado en las características del contexto y en la distribución geográfica de los principales puntos de distribución de materiales, asume la existencia de cinco niveles: el primero tiene que ver con los desplazamientos que se producen a escala local, el segundo nivel tiene que ver con los desplazamientos a escala regional, el tercero a escala extra-regional, el cuarto a escala continental y el quinto a escala intercontinental.

Esta modelización permite que el usuario pueda asignar fácilmente los niveles estimados desde donde se producen los desplazamientos de los materiales que componen el edificio, guardando representatividad en relación a la distribución de los puntos de suministro y fabricación.

Durante el procedimiento de aplicación el usuario podrá modificar las distancias de cada uno de

los materiales de forma independiente, pudiendo así utilizar este criterio para visualizar los impactos producidos por el transporte y desarrollar estrategias para reducirlos.

### 2.3.3.3.5 Escenarios para el uso de energía en servicio

Para la cuantificación del consumo de energía en fase de uso se definen hipótesis en función de los patrones de consumo. Estos patrones de consumo de energía para las viviendas unifamiliares en el contexto de estudio tendrán en cuenta los siguientes factores: horas de uso, tipo de sistemas de calefacción y aire acondicionado, tipo de equipamiento utilizado, tipo de sistemas de agua caliente sanitaria utilizados. Por otra parte, antecedentes de referencia (Picción et al., 2014) demuestran que las demandas de calefacción, las de refrigeración y las de agua caliente sanitaria son principalmente cubiertas por sistemas que utilizan energía eléctrica como principal fuente de alimentación.

De modo que se asume esta hipótesis para la simulación térmica de los casos de estudio, exceptuando que sea una condición explícita en el diseño del edificio.

Se asume que la totalidad de la energía consumida por las viviendas proviene de la red de distribución de energía nacional, exceptuando que el caso de estudio indique lo contrario. Las fuentes de producción primaria (ver Figura 3, Capítulo 1) serán las establecidas por las autoridades locales a través del último informe publicado sobre el balance energético nacional del año 2015 (DNE-MIEM, 2015). El factor de conversión de energía primaria calculado en base a fuentes oficiales para el año 2015 (última referencia publicada) es de 1.6 (DNE-MIEM, 2015).

#### **2.3.3.3.6 Escenario para la etapa de fin de vida**

Se incluyen los trabajos de deconstrucción y desmantelamiento del edificio derivados del uso de maquinaria y energía necesarias.

Para la elaboración de los escenarios referidos al transporte se ha seguido el modelo descrito en el apartado 2.3.3.3.4.

Para el módulo de tratamiento, reutilización, recuperación o reciclaje se prevé, dadas las características del contexto en relación a la reutilización de estos materiales descrita en Fichtner and LK-SUR Asociados, (2004), que los materiales desmontados no reciban tratamiento previo al vertido final. No obstante, la metodología desarrollada puede incorporar escenarios que prevean estos procesos. En relación al vertido final se asume de acuerdo con fuentes anteriormente expuestas que el material desmontado será trasladado a un vertedero municipal.

### 2.3.3.4 Cuantificación del edificio y su ciclo de vida

De acuerdo con lo establecido por la norma ISO 14040 (ISO, 2006a) la metodología del ACV prevé el desarrollo de la fase de Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) es en la que se recopilan y cuantifican “las entradas y las salidas a un sistema del producto durante su ciclo de vida”. Este procedimiento llevado a la aplicación del ACV en edificios incluye parte de lo descrito durante el proceso de “Cuantificación del edificio y su ciclo de vida”, que establece la norma EN 15978 (EN, 2011) (ver Figura 7).

La metodología desarrollada asume que la cuantificación de los materiales incluye los materiales que componen el edificio de acuerdo con lo definido por el modelo BIM y las cantidades de materiales que se utilizarán en fase construcción y uso del edificio, incluyendo las pérdidas de materiales.

Por otra parte, la norma EN 15978 (EN, 2011) establece la necesidad de especificar las cantidades “netas” y “brutas” a la hora de cuantificar los materiales que intervienen durante la vida útil del edificio. Para esta norma las cantidades netas son aquellas que se especifican en los planos y documentos de acuerdo con la obra construida (*as built*). Mientras que las cantidades brutas son aquellas que consideran las pérdidas que se producen debido a: pérdidas en tránsito, en la obra, en el tratamiento normal de productos, materiales, componentes; pérdidas debidas a diferencias en las dimensiones del producto y las del proyecto; requisitos de pedido de cantidades mínimas.

Para la cuantificación de las cantidades netas de materiales la metodología prevé su obtención a partir del modelo BIM del edificio (LOD 300), lo

cual permite adquirir datos sobre las cantidades estimadas de los materiales netos durante la fase de diseño. Esta cuantificación de materiales que parte del modelo BIM contendrá únicamente información sobre las cantidades de los materiales BIM, el resto de los materiales que intervienen durante el ciclo de vida del edificio que no estén especificados en la cuantificación inicial de materiales estarán contenidos en las fichas de materiales de la biblioteca de materiales. Esta biblioteca incorpora aquellos materiales que puedan ser imputables al material BIM y que tengan una relación directa con este mediante un coeficiente o factor. Para el caso de materiales tales como escaleras o andamios, para los cuales no es posible imputar su uso a ningún material en particular, (por ejemplo, una escalera se usa para pintura, enfoscados, etc.) no serán contabilizados como parte del sistema.

Para la cuantificación de las cantidades brutas se prevé establecer coeficientes de desperdicios, que dependiendo el tipo de montaje y materiales variará entre 10% y 1% de acuerdo con cifras establecidas por trabajos anteriores adaptados al contexto de estudio (Peluso, 2011).

Por otra parte, la norma de referencia EN 15978 (EN, 2011) establece que durante esta instancia de evaluación las fuentes de datos recomendadas serán las indicadas en la Tabla 7: los datos genéricos, datos agregados, datos promedio, la definición de modelos de escenarios para la etapa de uso. Mientras que los datos colectivos de producto, los datos promedio de producto, los datos específicos de productos y otros datos estarán sujetos a disponibilidad.

**Tabla 7.** Tipo de datos a utilizar según lo establecido por la norma EN 15978.  
(Fuente: elaboración propia basada en norma 15978)

Dato recomendado	Punto en el período de la evaluación				
	Fase diseño	Fase proyecto	Fase construcción	Fase uso	Fase fin de vida del edificio
Datos genéricos	R	R	R	R	R
Datos agregados	R	R	-	-	-
Datos promedio	R	R	R	R	R
Datos colectivos de producto	A	R	R	R	R
Datos promedio de producto	A	R	R	R	R
Datos específicos de producto	A	R	R	R	R
Modelos de escenarios para la etapa de uso	R	R	R	R	-
Datos medidos	-	-	R	R	R

Teniendo en cuenta el contenido anteriormente expuesto, la metodología desarrollada utiliza como fuentes de datos válidas: datos genéricos, datos promedio combinados de diferentes fabricantes, información específica sobre los componentes y modelos de escenarios para la etapa de uso.

Para el contexto de referencia y los casos de estudio no se han utilizado datos colectivos tales como DAPs de productos, debido que o bien los materiales utilizados en los casos evaluados no presenta por el momento ese tipo de declaraciones ambientales (DAPs) o se ha incluido indicadores que describen categorías de impacto que no están expresado en los resultados de las DAPs.

### 2.3.3.5 Selección de categorías de impacto y métodos de evaluación

A nivel normativo (EN, 2012a, 2011) las categorías de impacto que producen los edificios deben ser expresadas de acuerdo con los siguientes indicadores que describen impactos ambientales: “Potencial de calentamiento global”, “Potencial de agotamiento de la capa de ozono”, “Potencial

de acidificación de tierra y agua”, “Potencial de formación de oxidantes fotoquímicos del ozono troposférico”, “Potencial de agotamiento de recursos abióticos para elementos ADP\_elementos” y “Potencial de agotamiento de recursos para combustibles fósiles. ADP\_combustibles fósiles”. Del mismo modo se deben incorporar los indicadores que describen el uso de recursos: “uso de la energía primaria renovable excluyendo los recursos de energía utilizados como materia prima”; “el uso de los recursos energía primaria renovable utilizados como materia prima”; “el uso de energía primaria no renovable excluyendo los recursos de energía utilizados como materia prima”; “el uso de recursos energía primaria no renovable utilizados como materia prima; el uso de materiales secundarios”; “el uso de combustibles secundarios renovables; potencial de agotamiento para recursos abióticos para elementos, ADP\_elementos”; “el potencial de agotamiento de recursos abióticos para combustibles fósiles”. Por otra parte, se prevé la incorporación de indicadores que describen la información ambiental adicional, tales como: “residuos peligrosos vertidos”, “residuos no peligrosos vertidos”, “residuos radioactivos”. También se prevé la incorporación



de indicadores que describen los flujos de salida que abandonan el sistema: “componentes para reutilización”, “materiales para reciclaje”, “materiales para valorización energética”, y “energía exportada”.

Estos indicadores incluidos en la normativa de referencia (EN, 2012a, 2011) describen las categorías de impacto en las que deben expresarse los resultados una vez completado el proceso de evaluación del edificio. Estos resultados también servirán como patrones de referencia para poder comparar diferentes casos de estudio.

De acuerdo con los antecedentes analizados (Malmqvist et al., 2011) una de las estrategias utilizadas para la simplificación de la aplicación del ACV en viviendas es la reducción de los indicadores de impacto considerados. En el entendido que la metodología desarrollada busca ser aplicada durante la fase de diseño de los edificios, se busca reducir los esfuerzos por parte de técnicos y diseñadores asumiendo la utilización de los indicadores que resulten más representativos durante esa fase y puedan orientar la toma de decisiones durante el proceso de evaluación.

De modo que en primera instancia se opta por utilizar indicadores que resulten representativos para el objeto de estudio a nivel general, y a su vez que se ajusten a lo establecido por las normativas de referencia.

Por otra parte, se busca que la selección de las categorías de impacto evaluadas sea representativa a nivel local y en particular para el caso de estudio y los objetivos planteados durante el proceso de evaluación.

### 2.3.3.6 Definición de comunicación de resultados

La metodología propuesta busca adaptarse al procedimiento de evaluación durante la fase de diseño del edificio, de modo que la información que se comunica debe de ser fiable y a su vez ser capaz de que el usuario pueda interpretarla y utilizarla para modificar y optimizar los elementos que componen el edificio, así como también ayudarlo a tener una mayor conciencia sobre los elementos que intervienen en el ciclo de vida del edificio y los impactos que produce durante su ciclo de vida.

La forma de comunicar los resultados definida por las normas de referencia (EN, 2012a, 2011) prevé que los resultados sean organizados de acuerdo con los módulos de información en los que han sido producidos los impactos y separando las diferentes categorías de impacto, de acuerdo con los indicadores que describen impactos ambientales, los indicadores que describen el uso de recursos, los indicadores que describen la información ambiental adicional (los que describen categorías de residuos y flujos de salida que abandonan el sistema), de forma tal que se pueda reconocer fácilmente de donde se producen los mayores impactos.

La organización de los resultados de la metodología propuesta se desarrolla en primer lugar de acuerdo con lo establecido por estas normas de referencia (EN, 2012a, 2011), separando los impactos que se producen durante el ciclo de vida de acuerdo con los módulos de información, con el fin de visualizar los impactos que se producen durante el ciclo de vida y ayudar a modificar u optimizar los escenarios de ciclo de vida. Al tiempo

que, complementario a lo que establece esta norma se entiende que durante el proceso de diseño es necesario contar con información que se vincule directamente con los *inputs* que se están incorporando en el proceso de diseño en el entorno BIM, es decir con los **componentes y materiales BIM** (BIM components -BIM materials,) dado que son los datos que el diseñador podrá manipu-

lar durante y luego del proceso de evaluación. De modo que los resultados que se presentan también reflejan independientemente los impactos que se producen por componentes y materiales BIM, y se organizan de acuerdo con las categorías de impacto seleccionadas.

#### 2.3.4 Justificación de las principales estrategias de simplificación del ACV aplicadas y de integración BIM-ACV

De acuerdo con lo anteriormente expuesto la metodología propuesta asume ciertas simplificaciones en relación a lo establecido por las normas EN 15978 (EN, 2011) y EN 15804 (EN, 2012a) para la aplicación del ACV en edificios. Esto se fundamenta sobre la base de que esta se centra en orientar la toma de decisiones en fase de diseño, y se asume que las incertidumbres forman parte de este proceso. Por este motivo, se busca sistematizar la elaboración de hipótesis y modelos que ayuden a predecir el comportamiento ambiental del edificio durante su ciclo de vida, adaptados a una determinada tipología edilicia y en un contexto determinado. A continuación, se detallan las principales estrategias de simplificación e integración de la aplicación del ACV a entornos BIM:

- La metodología propuesta se aplica al edificio en fase de diseño y no en fase “as built”, como señala la norma EN 15978 (EN, 2011). Se utiliza un modelo BIM de nivel de detalle LOD 300, para asegurar la definición de capas de materiales y elementos constructivos. Antecedentes sobre el tema (Lee et al., 2015) demuestra que este nivel de detalle permite obtener datos sobre la cuantificación de materiales y componentes de los edificios

para llevar adelante la evaluación de los impactos ambientales del edificio.

- Al igual que los trabajos analizados anteriormente centrados en la aplicación del ACV a viviendas unifamiliares (Agya Utama et al., 2012; Babaizadeh et al., 2015; Cuéllar-Franca and Azapagic, 2012; Dahlstrøm et al., 2012; Fouquet et al., 2015; Gervasio et al., 2014; Hanandeh, 2015; Houlihan Wiberg et al., 2014; Iddon and Firth, 2013; Islam et al., 2014; Lewandowska et al., 2013; Monteiro and Freire, 2012; Mosteiro-Romero et al., 2014; Motuziene et al., 2016; Oyarzo and Peuportier, 2014; Peuportier et al., 2013; Proietti et al., 2013; Rosselló-Batlle et al., 2015; Rossi et al., 2012b; Takano et al., 2015b) la metodología propuesta considera reducir algunas fases del ciclo de vida, ya que algunas pueden que no sean relevantes durante la fase de diseño (Ej. B7- fase de uso del agua en servicio) o no se disponga de datos para cuantificar los impactos (Ej. B1-fase de uso). Por otra parte la norma EN 15978 (EN, 2011) también establece que la evaluación puede restringirse a una parte del edificio o a parte del ciclo de vida del edificio, debiendo estar documentado y argumentado.

- En cuanto a la consideración de las distancias y los transportes, dadas la escala de los proyectos y las características del contexto de estudio. En el punto 2.3.3.3.4 se detalla la hipótesis considerada con el fin de reducir los esfuerzos en la obtención de los datos y aproximarse a las características del desplazamiento de mercancías en el contexto de estudio. Además esta hipótesis es un procedimiento práctico para el usuario a la hora de asignar las distancias desde donde se trasladan los materiales y componentes del edificio. Modelos simplificados de asignación de transporte de materiales son también asumidos por Cuéllar-Franca and Azapagic (2012) para el desarrollo del ACV de viviendas unifamiliares en Reino Unido y por García-Martínez, (2010) para el contexto de Andalucía.

- Se reduce el número de indicadores a incluir en la comunicación de los resultados de acuerdo con lo señalado por Malmqvist et al. (2011), de modo que se consideran los más relevantes para el proyecto, el contexto y la fase desarrollo en la que se encuentra el edificio. Trabajos de referencia como el caso de Hanandeh (2015), utilizan esta estrategia de seleccionar las categorías de impacto en función de la relevancia que tengan para el contexto de estudio.

- Como estrategia para la integración de herramientas BIM y ACV, desde el punto de vista operativo, se parte de la definición de una plantilla de trabajo (template) la cual contiene los principales elementos constructivos y materiales, así como los datos sobre las propiedades físicas de los materiales adaptados a las características del contexto de referencia. Al igual que el trabajo de Lee et al., (2015) la metodología propuesta parte de una plantilla (*Template*), mientras que el trabajo desarrollado complementa los datos ambientales de los materiales del modelo BIM fuera del entorno BIM.

- Para asegurar que el flujo de información sea de forma directa y el usuario pueda modificar de acuerdo con las características del proyecto datos relevantes sobre el ciclo de vida de los materiales que se utilizan en el proyecto se opta por configurar una estructura de datos semi-automática, dejando algunos campos semi-abiertos. Trabajos de referencia tales como Basbagill et al., (2013); Jalaei and Jrade, (2014); Jrade and Jalaei, (2013) desarrollan también estrategias de integración semi-automáticas.

## 2.4 Aplicación de la metodología simplificada a casos de estudio: comparación de alternativas para la envolvente de una vivienda unifamiliar y comparación de 3 soluciones de viviendas unifamiliares (Artículo III).

El siguiente apartado describe el proceso de verificación de la metodología desarrollada mediante su aplicación en los casos de estudio seleccionados. Este procedimiento se ha desarrollado teniendo en cuenta el contexto de referencia y la tipología edilicia más frecuente allí desarrollada. Por otra parte, se busca ayudar a realizar los ajustes correspondientes y definir recomendaciones para el desarrollo de instrumentos de ayuda en fase de diseño.

La selección de los casos de estudio ha estado orientada hacia soluciones constructivas diversas que también guarden representatividad con el contexto de referencia, desarrolladas en los últimos 10 años y destinada a un número de ocupantes similar. Los casos de estudio seleccionados han sido tres.

El primer caso se trata de una vivienda de interés social y promoción pública (COVISA), promovida por la ANV-MVOTMA, (2017), y construida a través del sistema cooperativo por ayuda mutua, muy extendido en este contexto. Este tipo de vivienda busca ajustar al máximo los costes de construcción. Se trata de una vivienda pareada que forma parte de un complejo de 72 viviendas llamado “COVISA”, construido en el año 2010 y ubicado en la localidad de Sauce a 36 km de Montevideo. La unidad analizada es una vivienda de 3 dormitorios con una superficie útil de 55 m<sup>2</sup> aprox., la cual sido construida combinando obra de fábrica de ladrillo y bloque de hormigón con estructura de acero y cubierta liviana inclinada de 2 aguas.

El segundo caso de estudio se trata de “La Casa Uruguaya” (LCU) (Universidad ORT, Uruguay, 2015), una vivienda diseñada aplicando criterios de sostenibilidad y galardonada con el Primer Premio en el concurso Solar Decathlon Latinoamérica 2015, y desarrollada por estudiantes de arquitectura de la Universidad ORT, Uruguay. Esta vivienda presenta la particularidad de que ha sido diseñada y construida en Montevideo, pero se ha ensamblado e instalado de forma temporal en Santiago de Cali (Colombia), por lo que para este estudio se considera el contexto de Montevideo como su lugar de emplazamiento. La vivienda tiene 3 dormitorios, una superficie útil de 63 m<sup>2</sup> aprox. y ha sido construida enteramente en madera (cerramientos y estructura), siendo considerado en este contexto como un material de creciente interés para su utilización en la construcción civil (Cortazzo, 2014).

El tercer caso seleccionado ha sido una vivienda (RIFA) diseñada siguiendo criterios de diseño que privilegian la iluminación y ventilación natural, así como también los espacios en doble altura entendido como un recurso para enriquecer las cualidades funcionales y espaciales de la vivienda. Esta vivienda ha sido galardonada con el Primer Premio en el concurso anual de estudiantes del grupo de viaje de Arquitectura Rifa generación 2006 de la Facultad de Arquitectura de la UdelAR, Uruguay. Esta vivienda también presenta la particularidad de haber sido diseñada por un grupo de estudiantes de arquitectura (Andrés Varela, Elías Martínez, Ignacio de Souza, Joaquín Mascheroni), y su ejecución ha sido supervisada por un equipo de técnicos. Se emplaza en el barrio de

la Blanqueada (Montevideo) y su construcción ha finalizado en el año 2013. La vivienda de 3 dormitorios, tiene una superficie útil de 100 m<sup>2</sup> aprox., y presenta una estructura de hormigón armado y acero, cubierta inclinada de hormigón armado y cerramientos de fábrica de ladrillo hueco.

La aplicación de la metodología desarrollada, a estos casos de estudio se realiza considerando dos alternativas de aplicación. La primera se centra en evaluar tres alternativas constructivas para el

diseño de la envolvente (vertical y horizontal) de una misma vivienda (la de interés social). La segunda alternativa de aplicación evalúa comparativamente las tres viviendas seleccionadas. Esto se realiza con el objetivo de verificar viabilidad de la metodología desarrollada para evaluar diferentes alternativas constructivas para un mismo caso y también para verificar la capacidad de comparar diferentes casos de viviendas unifamiliares con características constructivas y materialidades diferentes.

### 2.4.1 Definición del objetivo y alcance

Se parte del entendido de que una de las mayores potencialidades que presentan las herramientas BIM es su capacidad de gestionar diversos datos sobre el edificio, tanto a nivel gráfico como datos sobre materiales y componentes que lo conforman. Este tipo de herramientas aplicadas en fase de diseño ayudan a obtener de forma rápida y sencilla modelos virtuales del edificio, convirtiéndose en instrumentos de gran ayuda durante el proceso de toma de decisiones de aspectos tan decisivos desde el punto de vista del consumo de recursos como son la forma y disposición volumétrica, la estructura y la envolvente (materialidades y huecos).

Se busca que los objetivos y alcance de las aplicaciones del ACV guarden relación con los datos de entrada del entorno BIM, especialmente aquellos que tienen mayor relevancia en la fase de concepción y diseño del edificio. De modo que, según lo expuesto en el punto 2.3.3.1, el nivel de detalle (LOD) que servirá como estructura de datos de entrada para la aplicación del ACV para los dos casos estudiados será de LOD 300.

El caso 1 tiene por objetivo comparar dentro de una misma vivienda, 3 alternativas constructivas para la envolvente, partiendo de considerar el escenario original y 2 escenarios de mejora desde el

punto de vista del desempeño térmico de la envolvente (vertical y horizontal). El estudio busca evaluar comparativamente los impactos que producen las tres soluciones alternativas, enfocándose en el sistema del edificio que mayor relevancia tiene en la reducción de los impactos ambientales que producen los edificios (Hanandeh, 2015; Kolokotroni et al., 2004; Monteiro, 2010; Sartori and Hestnes, 2007). Por otra parte, los modelos BIM considerados para llevar adelante estas evaluaciones contienen exclusivamente la información gráfica y los datos sobre la vivienda, tales como los cerramientos verticales (muros exteriores, ventanas y puertas), y los cerramientos horizontales (cubierta y solería).

Al tiempo que el caso 2 tiene por objetivo comparar tres viviendas unifamiliares, con similar número de ocupantes, las cuales utilizan tecnologías y materiales diversos. Este estudio busca analizar comparativamente estas 3 soluciones focalizándose en la envolvente y la estructura. Los modelos BIM en los que se basa la aplicación del ACV incorporan la estructura, los cerramientos verticales y horizontales (incluyendo cerramientos exteriores y particiones) de las viviendas, no se incluyen espacios exteriores ajardinados o rampas de vehículos.



#### 2.4.1.1. Definición de equivalentes funcionales

La definición del equivalente funcional adaptada a la metodología que se desarrolla, según se detalla en el apartado 2.3.3.1, está dada definición del modelo BIM del edificio, es decir que estará compuesta por todos los elementos del edificio que estén incluidos en el modelo BIM del edificio

De modo que para el caso 1 se utiliza como equivalente funcional la envolvente de la vivienda. A nivel operativo se utilizarán tres modelos BIM de la misma vivienda, los cuales se podrán ajustar de acuerdo con las dimensiones de cada uno de los elementos que componen la envolvente, es decir, muros exteriores, cubiertas, suelos, ventanas y puertas exteriores. El período de referencia asumido para llevar adelante la evaluación será de 60 años, asumiéndose un escenario similar al establecido por Pelufo, (2011) para desarrollar el análisis de la energía incorporada en el ciclo energético de vida de un edificio en este contexto.

Para el caso 2 el equivalente funcional será la vivienda entera, incluyendo estructura (cimentaciones, pilares, vigas y forjados), la envolvente (muros exteriores, cubiertas, suelos, ventanas y puertas exteriores) y los elementos de distribución interior tales como tabiques puertas, así como elementos de circulación interior, ta-

les como escaleras. Dado que la definición del equivalente funcional está íntimamente ligada al proceso de diseño y al proceso de evaluación de impactos del edificio, para este caso busca incluir aquellos elementos que resulten relevantes en la fase de diseño del edificio y que puedan ser modificados u optimizados durante el proceso de evaluación. En ese sentido elementos como las instalaciones (cableados, trazados de tuberías y pequeños elementos) equipamiento y mobiliario no forman parte del equivalente funcional. Este caso de estudio presenta la particularidad que, dado que se trata de viviendas que tienen superficies y volúmenes construidos diferentes, se entiende que no resulta una comparación “transparente y razonable” como lo define la norma EN 15978 (EN, 2011). Para ello se utiliza como unidad de referencia para comparar los tres casos el  $m^2$  de superficie útil, asumiéndose como período de referencia un año. Este procedimiento de ajuste se realiza de acuerdo con lo establecido por la norma EN 15978 (EN, 2011), de modo que los impactos de producción, construcción, uso (excepto energía operacional) y deconstrucción son ajustados a los producidos por  $m^2$  de edificio, al tiempo que, los impactos producidos por el consumo energético en fase operacional son ajustados a los producidos por  $1 m^2$  por año.

**Tabla 8.** Esquema de módulos de información definidos por EN 15978 incluidos en los casos de estudio.  
(Fuente: elaboración propia basado en EN 15978)

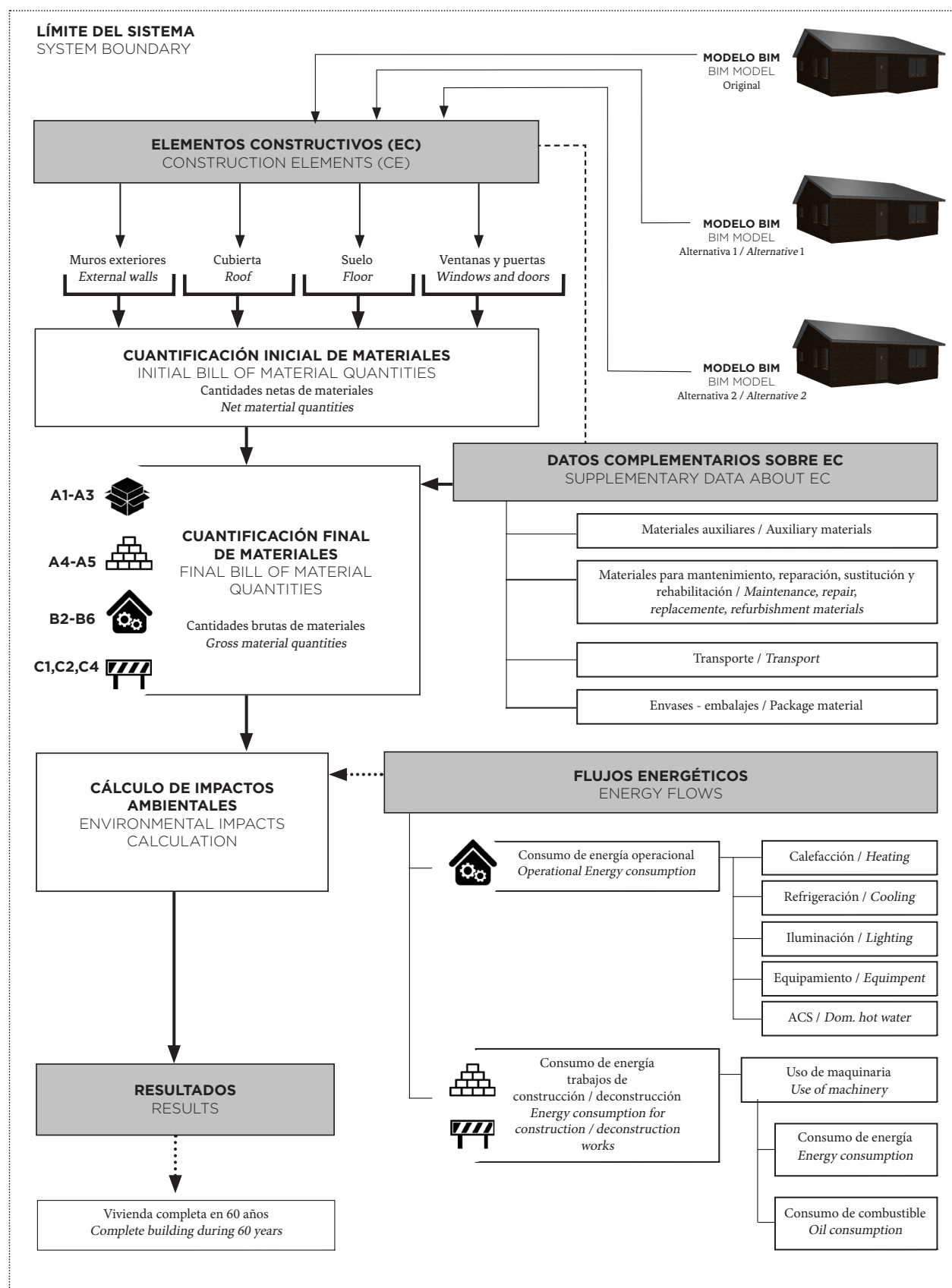
Información del ciclo de vida del edificio																		
Información del ciclo de vida del edificio																	Información adicional más allá del ciclo de vida del edificio	
CASO	A1-A3 Etapa de producto			A4-A5 Etapa de construcción		B1-B7 Etapa de uso							C1-C4 Etapa de fin de vida				Beneficios y cargas más allá del límite del sistema	
	A1	A2	A3	A4	A5	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	C1	C2	C3	C4	D	
1	X	X	X	X	X		X	X	X		X		X	X		X		
2	X	X	X	X	X		X	X	X		X		X	X		X		

#### 2.4.1.2 Límite del sistema

De acuerdo con lo fundamentado en el punto 2.3.3.2 sobre los límites del sistema la metodología propuesta incorpora los módulos de información sobre el ciclo de vida de los edificios expresados en la Tabla 8, se ha optado por que ambos casos de estudio incorporen la misma cantidad de módulos de información, considerándose los más relevantes durante la fase de diseño.

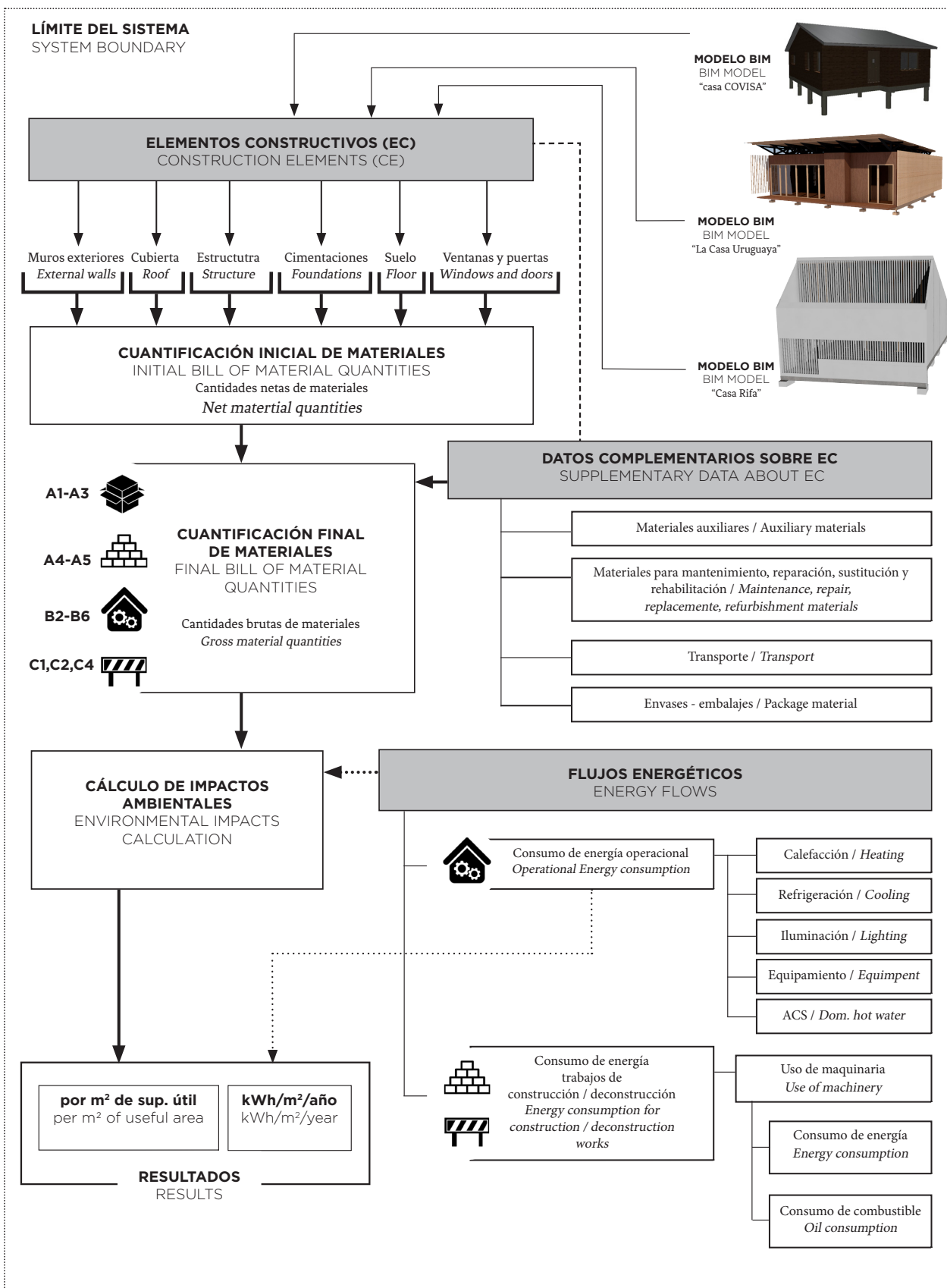
A nivel operativo, el límite del sistema en términos físicos, están en gran medida definido por la información que se incluya en el modelo BIM, la información complementaria que se incorpore posteriormente y los datos sobre flujos energéticos que intervienen en el edificio en fase de construcción, uso y deconstrucción. En las Figuras 8 y 9 se muestra el límite del sistema considerado en cada uno de los casos estudiados. Estos esquemas incluyen la cantidad de datos sobre el edificio que se ha incorporado en los modelos BIM, los datos complementarios que se incorpora mediante la librería de materiales BIM y el límite de los cálculos sobre el consumo energético, en fase de construcción, uso y deconstrucción.

## CASO DE ESTUDIO 1



**Figura 8** Esquema de límite del sistema considerado para el caso 1. (Fuente: elaboración propia)

## CASO DE ESTUDIO 2



**Figura 9** Esquema de límite del sistema considerado para el caso 2. (Fuente: elaboración propia)

### 2.4.1.3 Categorías de impacto

La definición de las categorías de impacto se realiza teniendo en cuenta los aspectos establecidos en la norma EN 15978 (EN, 2011), así como también las características de contexto en el que se enmarcan los casos de estudio, y siempre teniendo en cuenta la utilidad y finalidad de los resultados para lo que son proyectados. Por otra parte, para la elección de las categorías de impacto se tiene en cuenta la más utilizada en esta tipología. Diversos trabajos (Agya Utama et al., 2012; Babaizadeh et al., 2015; Cuéllar-Franca and Azapagic, 2012; Fouquet et al., 2015; Lewandowska et al., 2013; Monteiro and Freire, 2012; Mosteiro-Romero et al., 2014; Motuziene et al., 2016; Oyarzo and Peuportier, 2014; Peuportier et al., 2013; Proietti et al., 2013) evidencian que el Potencial de Calentamiento Global (GWP) corresponde a la categoría más utilizada para analizar los impactos producidos por esta tipología.

Para el **caso 1** dado que los objetivos de evaluación se centran en determinar los impactos que producen los materiales de la envolvente. Se han elegido categorías de impacto que afectan directamente a los recursos hídricos y habitantes de la zona. Las categorías de impacto seleccionadas son: Potencial de Calentamiento Global (GWP) y Potencial de agotamiento del Ozono (OPD), como categorías que propone la norma EN 15978 (EN, 2011) para expresar los resultados; Ecotoxicidad del agua dulce (FWE), Toxicidad humana (HT) y Potencial de agotamiento del Ozono (OPD) como categorías que se entienden representativas para el contexto de referencia. FWE y HT resultan significativas dada la importancia que tienen los recursos hídricos en esta zona, base fundamental del sustento económico y la vida humana. ODP

resulta relevante dada la proximidad de la zona de estudio al agujero de ozono de la Antártida (Nasa, 2017).

Para el **caso 2** las categorías de impacto seleccionadas se han elegido de acuerdo con los mismos criterios que el caso 1. En este caso se incorporarán 2 categorías más de impacto: Potencial de eutrofización de tierra y agua (EP) y Potencial de Acidificación (AP), incorporando un mayor número de categorías de impacto contenidas en la norma EN 15978 (EN, 2011), a los efectos de obtener datos susceptibles de ser comparados con otros casos y que resultan además relevantes para la zona de estudio. El Potencial de Eutrofización (EP) resulta relevante para cuantificar los impactos producidos en los ecosistemas y afecta principalmente al contenido de nutrientes, alterando la productividad biológica de ciertas especies (Baumann and Tillman, 2004). El Potencial de Acidificación de tierra y agua (AP) resulta también relevante para cuantificar los efectos de la acidificación del pH del suelo y la tierra. Algunas de las consecuencias de su aumento pueden producir el aumento de la mortalidad de peces en lagos, la filtración de metales tóxicos en el rocas y suelo, daños en los bosques y acelerar el deterioro de edificios y monumentos (Harrison, 1990). Más allá de que el contenido de algunos de las principales sustancias (SO<sub>2</sub> y NO<sub>2</sub> para la acidificación, y P para la eutrofización) responsables de estos fenómenos han registrado alguna reducción en estos años según la monitorización realizada por DINAMA, (2015), resulta también una categoría relevante para este contexto según DINAMA, (2015).



### 2.4.2 Elaboración del inventario del ACV

Para la elaboración del inventario del ciclo de vida, se propone organizar la cuantificación de los materiales del edificio utilizados durante su ciclo de vida en 3 etapas: cuantificación automática de las cuantías de materiales que componen el modelo BIM del edificio, la complementación de esta información mediante la biblioteca de materiales BIM y la reorganización de todos estos materiales de acuerdo con la lista de materiales básicos seleccionados. Finalmente, de acuerdo con la lista de materiales básicos se definen los procesos unitarios a incluir.

Por otra parte, esta fase de inventario también incluye la estimación de los consumos de energía durante la fase de construcción y deconstrucción del edificio, y de los consumos de energía en fase de uso del edificio.

Durante la primera etapa se define una plantilla de trabajo elaborada en el entorno BIM, donde se definen los materiales, componentes y sus propiedades. Para los casos de estudio se ha elaborado una plantilla que contiene datos generales aplicables a las 3 viviendas evaluadas. Esta plantilla tiene por objetivo organizar y etiquetar la información sobre los materiales y componentes BIM que contienen los modelos virtuales de los edificios evaluados. La Tabla 9, contiene el listado de materiales BIM utilizados para evaluar los casos de estudio.

Para la cuantificación de los materiales y elementos se han utilizado los listados automáticos que genera el software BIM. No obstante, se han encontrado algunas limitaciones que presenta este tipo de software para cuantificar objetos BIM, debido a que la información requerida sobre estos objetos para realizar la aplicación del ACV es poco frecuente en procesos de diseño y ejecución

de edificios. Por ejemplo, el dato sobre la cantidad de aluminio contenida en una ventana expresada en peso, requerida para realizar la aplicación del ACV, no es un dato que sea relevante durante los procesos de diseño y construcción. De modo que elementos tales como ventanas, puertas, escaleras y cerchas, han sido cuantificadas de forma semi-automática.

Posteriormente este listado de cuantías inicial ("Initial bill of quantities"), obtenido del software BIM, se complementa y reorganiza de acuerdo con los componentes de cada uno de los materiales que forman parte de los materiales de la lista de materiales BIM.

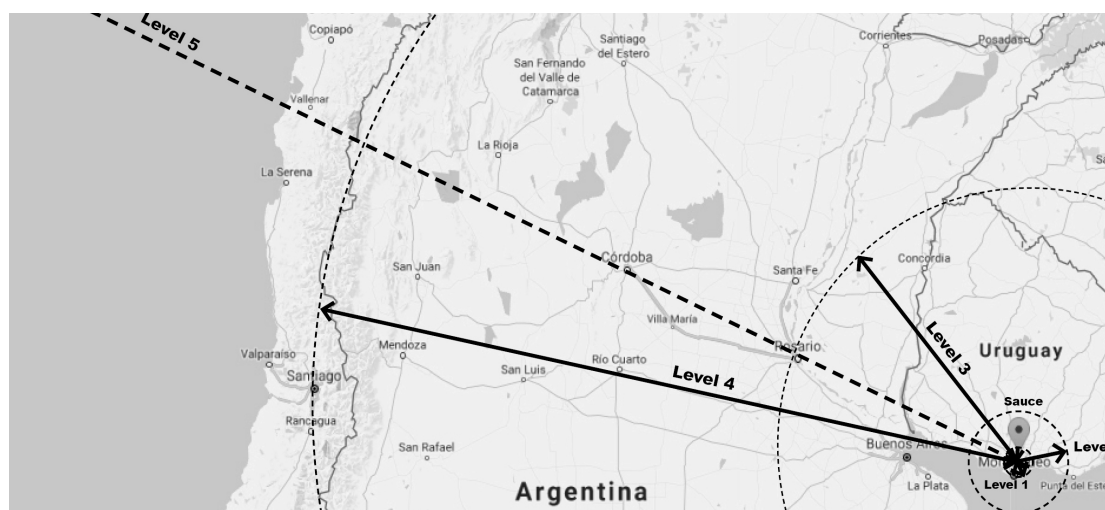
Este proceso de complementación se produce a través de las fichas de materiales BIM, las cuales contienen la información necesaria para completar la aplicación de la metodología del ACV. Su elaboración se ha realizado basada en hipótesis de acuerdo con contexto considerado, por ejemplo, dosificaciones de morteros, distancias estimadas a puntos de fabricación y obtención de materias primas, etc.

Las hipótesis de partida para la elaboración de las fichas se basaron en fuentes de datos locales, datos obtenidos de los recaudos gráficos y documentación técnica de los proyectos, así como también a partir de datos proporcionados por los fabricantes. No obstante, para la elaboración de estas fichas se han adoptado algunos criterios de simplificación que apuntan principalmente a unificar materiales similares utilizados en los diferentes casos de estudio. Por ejemplo, para el caso de los morteros, se ha utilizado la misma dosificación para evaluar todos los casos de estudio. Para los casos de estudio se asumen los materiales BIM contenidos en la Tabla 9.

**Tabla 9.** Lista de materiales BIM utilizados en los casos de estudio. (Fuente: elaboración propia)

Material BIM	Tipo de elemento	Caso de estudio	Vivienda de estudio
aerated concrete block	Cerramiento vertical	1	1
aluminium	Cerramiento vertical	1,2	1,3
bitumen	Cerramiento vertical	1,2	1,2
brick	Cerramiento vertical	1,2	1
brick_hollow	Cerramiento vertical	1	3
ceramic tile	Cerramiento vertical	1,2	1
ceramic_tile_bath	Cerramiento horizontal	1	1,3
concrete blocks_enevelope	Cerramiento vertical	1,2	2
concrete blocks_interior	Cerramiento vertical	2	1,2,3
concrete_column	Cerramiento horizontal	2	2
concrete_floor	Estructura	1,2	2
concrete_foundation	Estructura	2	2
concrete_roof	Estructura	2	2
concrete_slabs	Estructura	2	2
concrete_wall	Estructura	2	2
glass wool	Cerramiento vertical / horizontal	1,2	2
mortar_ceramics	Cerramiento horizontal	1	1
mortar_exterior	Cerramiento vertical	1,2	1,3
mortar_floor	Cerramiento horizontal	2	3
mortar_interior	Cerramiento vertical	1,2	1,3
mortar_roof	Cerramiento horizontal	2	3
mortar_wall	Cerramiento vertical	1,2	1,3
paint_exterior_wall	Cerramiento vertical	1	3
paint_exterior_wood	Cerramiento vertical	2	2
paint_interior_wall	Cerramiento vertical	1	1,3
paint_interior_wood	Cerramiento vertical	2	2
paint_roof	Cerramiento horizontal	2	3
polyethylene_floor	Cerramiento horizontal	2	2
polyethylene_wall	Cerramiento vertical	2	2
polystyrene_roof	Cerramiento horizontal	1,2	1,3
polystyrene_wall	Cerramiento vertical	1,2	1,2,3
polyurethane_roof	Cerramiento horizontal	1	1
plywood_exterior	Cerramiento vertical	2	2
plywood_interior	Cerramiento vertical	2	2
steel_roof	Cerramiento horizontal	1	1
steel_slabs	Estructura	2	1
steel_columns	Estructura	2	3
wood structure_beam	Estructura	2	2
wood structure_beam roof	Estructura	2	2
wood structure_columns	Estructura	2	2
wood_floor	Cerramiento horizontal	2	2,3
zinc	Cerramiento horizontal	1,2	1

Referencias: Caso 1: evaluación de alternativas de envolvente; Caso 2: evaluación de tres casos de vivienda; vivienda 1: casa apareada en cooperativa COVISA; vivienda 2: "la casa uruguaya"; vivienda 3: casa Arquitectura Rifa gen 2006.



**Figura 10** Localización esquemático de los niveles de transporte asumidos para asignación de distancias recorridas por los materiales. (Fuente: elaboración propia)

Por otra parte, estas **fichas complementarias de materiales BIM**, llevan asociada la asignación de los transportes para cada material (material principal, material auxiliar, material de mantenimiento, reparación, rehabilitación, sustitución) que compone el material BIM. Para ellos se ha optado por generar diferentes rangos por distancias, los cuales se clasifican en: locales, nacionales, continentales, transcontinentales, según lo descrito en el apartado 2.3.3.3.4.

Esto permite estimar aproximadamente las distancias y los medios de transporte utilizados, en función del origen de los materiales y las posibilidades de fabricación que existen en la zona donde se instala el edificio. En la Figura 10 se presenta de forma esquemática los niveles definidos de acuerdo con la localización asumida para los casos de estudio. Estos cinco niveles se han establecido partiendo de la base que las tres viviendas analizadas están localizadas en Montevideo y sus alrededores, es decir a distancias no mayores a 50 km, que es el límite establecido para el nivel 1. El nivel 2 (hasta 250 km) está dado por la dis-

tancia de Montevideo, capital y principal puerto logístico del país, a la ciudad de Minas, donde se encuentra uno de los principales puntos de extracción y fabricación de cemento portland. El tercer nivel (hasta 600 km) está dado por la distancia de Montevideo a la zona de Rivera, una de las mayores áreas de producción de madera para su uso en la construcción. También coincide con la distancia que se recorre desde algunos puntos de fabricación de otros productos utilizados en los casos de estudio, provenientes de Argentina o de la frontera con Brasil. El nivel 4 (hasta 1500km) está dado por recorridos de carácter continental, que llegan hasta la zona de Santiago de Chile y el sur de Brasil. El nivel 5 (hasta 15000km) incluye desplazamientos trasatlánticos provenientes principalmente de Europa, EEUU o México.

De acuerdo con las características logísticas de la zona se asume que los transportes en los niveles 1, 2 y 3 se realizan en camiones de 16 toneladas, y los trasportes de nivel 4 en camiones de 28 toneladas. Los transportes de nivel 5 se realizan en buques trasatlánticos y se asume como puerto de llegada el puerto de Montevideo.

**Tabla 10.** Estimación de los consumos energéticos de los edificios evaluados.  
(Fuente: García-Martínez et al., (2011))

Consumo energía en obra	MJ/m <sup>3</sup> material
Construcción	481
Reformas	741
Demolición	370
Total	1222
Consumo de diésel en maquinaria (70%)	855
Consumo eléctrico (30%)	136

**Tabla 11.** Hipótesis de franja horarias (en horas) de permanencia de ocupantes de las viviendas por estancia.  
(Fuente: elaboración propia)

Estancia de la vivienda	Lunes a viernes		Fines de semanas		Vacaciones	
	mañana	tarde	mañana	tarde	mañana	tarde
<b>Estar</b>	7 a 9	16 a 23	9 a 12	13 a 24	9 a 12	13 a 24
<b>Dormitorio 1</b>	1 a 7	23 a 24	1 a 9	-	1 a 9	-
<b>Dormitorio 2</b>	1 a 7	23 a 24	1 a 9	-	1 a 9	-
<b>Dormitorio 3</b>	1 a 7	23 a 24	1 a 9	-	1 a 9	-
<b>Cocina</b>	8 a 9	21 a 22	12 a 13	21 a 22	12 a 13	21 a 22
<b>Baño</b>	7 a 8	22 a 23	9 a 10	23 a 24	9 a 10	23 a 24

La estimación del **consumo energético durante la fase de uso y deconstrucción** ha sido desarrollada de acuerdo con las hipótesis aplicadas por García-Martínez (2011) y Kellenberger et al., (2004) para determinar estos consumos en función de los volúmenes de material utilizados (Tabla 10).

Para el **cálculo de las demandas energéticas durante la fase de uso** se ha llevado adelante una simulación térmica dinámica de las viviendas estudiadas en DesignBuilder v4.7.0.27 (Cockcroft, 2016). Para la calibración de los modelos se ha considerado las demandas de calefacción, refrigeración, iluminación, agua caliente sanitaria y equipamiento. Para los casos de las viviendas CO-VISA y la casa RIFA las fuentes de abastecimiento

energético son eléctricas y para el caso de “LCU” serán por energía solar y solar fotovoltaica.

Las temperaturas de consigna para regular los sistemas de calefacción y refrigeración han sido fijadas entre los 20° C para la calefacción y 27°C para la refrigeración, definida como área de confort y basadas en Picción et al. (2009). Las consideraciones sobre la ocupación de la vivienda han sido estimadas según la Tabla 11.

Las transmitancias térmicas de los cerramientos y las especificaciones constructivas de cada uno de ellos aplicadas durante el proceso de simulación se detallan en el **Anexo 2**.

### 2.4.2.1 Criterios de inclusión de entradas y salidas del sistema

La asignación de los flujos de entrada y salida al sistema constituye un aspecto importante dentro de la elaboración del inventario. Los criterios para la inclusión y exclusión de procesos unitarios están fundamentalmente basados para los casos de estudio en la norma EN 15804 (EN, 2012a). Las reglas de corte utilizadas para la aplicación de la metodología han sido las siguientes:

- Se desprecian aquellos procesos que no sean significativos en los insumos de masa y energía.

- Se excluyen los flujos relacionados con las actividades humanas como el transporte de los

empleados durante los procesos de fabricación, uso y deconstrucción. Así como también los flujos relacionados con los usuarios del edificio, tales como transporte, alimentación, vestimenta, etc.

- Se excluyen la construcción de las plantas, la producción de máquinas, sistemas de transporte, herramientas auxiliares y equipos utilizados en la obra, dado que los flujos relacionados se suponen son insignificante en comparación con la producción del edificio, dado que su ciclo de vida excede ampliamente los períodos de uso asumidos para el edificio.

### 2.4.2.2 Definición de procesos unitarios a incluir

Los procesos unitarios seleccionados para llevar adelante esta metodología provienen de la base de datos Ecoinvent v2.0 (Ecoinvent Centre, 2007). A pesar de ser una base de datos genérica y que contiene datos geográficamente no adaptados al contexto de estudio, diversos trabajos (Babaizadeh et al., 2015; Cuéllar-Franca and Azapagic, 2012; Dahlstrøm et al., 2012; Fouquet et al., 2015; Houlihan Wiberg et al., 2014; Lewandowska et al., 2013; Monteiro and Freire, 2012; Mosteiro-Romero et al., 2014; Oyarzo and Peuportier, 2014; Peuportier et al., 2013; Proietti et al., 2013; Takano et al., 2015b) confirman que es la fuente de datos más utilizada para la aplicación del ACV en viviendas unifamiliares en diversos contextos. Esto se debe principalmente a que contiene una gran variedad de procesos que pueden ser utilizados en los casos de estudio. También se reconoce el uso de bases de datos genéricas como una estrategia de simplificación durante la fase de inventario (EeB Guide Project, 2012).

La Tabla 12 muestra los procesos de fabricación y disposición final que se eligieron para cada uno de los materiales básicos que componen las viviendas evaluadas. A nivel general estos se corresponden con los procesos unitarios que dispone esta base de datos para cuantificar los impactos producidos durante las fases de producción y disposición final de estos materiales.

No obstante, se asume una hipótesis diferente para el caso del *brick* (ladrillo artesanal), utilizado en la vivienda “COVISA” y la casa “RIFA”. Debido que en el contexto de Uruguay el proceso de producción del ladrillo, también llamado “ladrillo de campo”, se realiza de forma artesanal, se asume la hipótesis definida por Casañas (2011), la cual establece que los mayores consumos energéticos se producen durante la fase de cocción del ladrillo. Casañas (2011) estima que por cada kilo de ladrillo se emplean 2,77 MJ de energía en el proceso de cocción en horno a leña, por lo tanto, el proceso seleccionado para la producción de este material es “logs, hardwood, burned in furnace 100Kw”.



**Tabla 12.** Relación de materiales básicos con procesos unitarios seleccionados.  
(Fuente: elaboración propia)

Material básico			Proceso de producción	Proceso de disposición final
aerated concrete blocks	kg		autoclaved aerated concrete block, at plant	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal
aluminium	kg		aluminium, secondary, from old scrap, at plant	disposal, aluminium, 0% water, to sanitary landfill
bitumen	kg		bitumen, at refinery	disposal, bitumen, 1.4% water, to sanitary landfill
brick	kg		logs, hardwood, burned in furnace 100kW	disposal, building, brick, to final disposal
brick hollow	kg			disposal, building, brick, to final disposal
cement	kg		cement, unspecified, at plant	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal
ceramic	kg		ceramic tiles, at regional storage	disposal, building, brick, to final disposal
concrete	m3		poor concrete, at plant	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal
concrete block	kg		concrete block, at plant	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal
concrete structure	m3		concrete, normal, at plant	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal
concrete foundations	m3		concrete, sole plate and foundation, at plant	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal
detergents	kg		soap, at plant	
glass	kg		flat glass, coated, at plant	disposal, glass, 0% water, to inert material landfill
glass wool	kg		glass wool mat, at plant	disposal, building, mineral wool, to final disposal
gravel	kg		gravel, round, at mine	disposal, building, concrete gravel, to final disposal
limestone	kg		limestone, at mine	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal
mortar	kg		cement, unspecified, at plant	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal
packaging paper	kg		packaging, corrugated board, mixed fibre, single wall, at plant	disposal, paper, 11.2% water, to sanitary landfill
packaging PVC	kg		polyvinylchloride, at regional storage	disposal, building, polyvinylchloride products, to final disposal
packaging wood	m3		sawn timber, softwood, raw, kiln dried, u=20%, at plant	disposal, building, waste wood, untreated, to final disposal
paint wall	kg		alkyd paint, white, 60% in H2O, at plant	disposal, building, paint on wall, to final disposal
paint wood			alkyd paint, white, 60% in solvent, at plant	disposal, building, paint on wood, to final disposal
polyethylene	kg		packaging film, LDPE, at plant	disposal, building, polyethylene/polypropylene products, to final disposal
polystyrene	kg		polystyrene, expandable, at plant	disposal, building, polystyrene isolation, flame-retardant, to final disposal
polyurethane	kg		polyurethane, flexible foam, at plant	disposal, building, polyurethane foam, to final disposal
polyvinyl chloride	kg		polyvinylchloride, at regional storage	disposal, building, polyvinylchloride products, to final disposal
reinforced steel	kg		reinforcing steel, at plant	disposal, building, reinforcement steel, to final disposal
plywood interior	m3		plywood, indoor use, at plant	disposal, building, waste wood, chrome preserved, to final disposal
plywood outdoor	m3		plywood, outdoor use, at plant	disposal, building, waste wood, chrome preserved, to final disposal
sand	kg		sand, at mine	disposal, building, cement (in concrete) and mortar, to final disposal
solvents	kg		solvents, organic, unspecified, at plant	
steel	kg		steel, low-alloyed, at plant	disposal, steel, 0% water, to inert material landfill
water	kg		tap water, at user	
wood	m3		sawn timber, softwood, raw, kiln dried, u=20%, at plant	disposal, building, waste wood, chrome preserved, to final disposal
wood structure	m3		sawn timber, hardwood, planed, kiln dried, u=10%, at plant	disposal, building, waste wood, chrome preserved, to final disposal
zinc	m2		zinc coating, coils	disposal, inert material, 0% water, to sanitary landfill

### 2.4.2.3 Criterios de calidad de los datos empleados

Con el objetivo de visualizar la antigüedad de los trabajos empleados, se desarrolla la Tabla 13 cuya estructura se basa en lo establecido por la norma EN 15804 (EN, 2012a) y el trabajo de Bizcocho Tocon, (2014). Esta tabla busca identificar y validar las fuentes de información sobre procesos unitarios utilizados durante la aplicación de la metodología.

La información que se muestra en la Tabla 13 revela que las principales fuentes de datos sobre procesos unitarios a considerar y datos sobre los mismos no superan el período recomendado de antigüedad de 10 años recomendado por la norma EN 15804 (EN, 2012a).

**Tabla 13** Resumen de las fuentes de datos utilizadas en la elaboración del inventario de ACV.  
(Fuente: elaboración propia)

Módulo de Información			Antigüedad
<b>A1-A2-A3</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Modelos BIM Trabajos de referencia (Casañas, 2011; Pelufo, 2011) Documentación técnica sobre casos de estudio.	6 años
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>A4</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Trabajos de referencia (Pelufo, 2011) Documentación técnica sobre casos de estudio.	6 años
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>A5</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Trabajos de referencia (Kellenberger et al., 2004) Documentación técnica sobre casos de estudio.	>10 años
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>B2</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Trabajos de referencia (Pelufo, 2011; Tavares, 2006). Documentación técnica sobre casos de estudio	6 años, > 10 años
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>B3</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Trabajos de referencia (Pelufo, 2011; Tavares, 2006). Documentación técnica sobre casos de estudio	6 años, > 10 años
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>B4</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Trabajos de referencia (Pelufo, 2011; Tavares, 2006). Documentación técnica sobre casos de estudio.	6 años, > 10 años
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>B5</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Trabajos de referencia (Pelufo, 2011; Tavares, 2006). Documentación técnica sobre casos de estudio	6 años, > 10 años
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>B6</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Simulación energética de edificios apartado 3.2.2 Documentación técnica sobre casos de estudio	
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>C1</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Trabajos de referencia (Kellenberger et al., 2004) Documentación técnica sobre casos de estudio.	>10 años
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>C2</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Trabajos de referencia (Fichtner and LKSUR Asociados, 2004; Pelufo, 2011) Documentación técnica sobre casos de estudio.	6 años, >10 años
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años
<b>C4</b>	Cuantificación y tipos de procesos	Modelos BIM Documentación técnica sobre casos de estudio.	
	Procesos unitarios	Ecoinvent v2.0	10 años

### 2.4.3 Evaluación de impactos

Para la evaluación de las categorías de impacto seleccionadas en el apartado 2.4.1.3 se ha optado por la utilización del método CML 2001. A través de la utilización de este “ready-made” método se pueden reducir esfuerzos en la fase de Evaluación de Impactos del Ciclo de Vida (EICV), ya que no se entra en profundidad durante los procesos de clasificación, caracterización, normalización,

agrupación y ponderación de los datos del inventario (Baumann and Tillman, 2004). Por otra parte se constata que este método ha sido utilizado en trabajos de referencia (Agya Utama et al., 2012; Cuéllar-Franca and Azapagic, 2012; Monteiro and Freire, 2012; Oyarzo and Peuportier, 2014) para aplicar el ACV en esta misma tipología de viviendas.

### 2.4.4 Estructura de los datos de salida y comunicación de resultados

De acuerdo con los anteriormente expuesto en el apartado 2.3.3.6, este trabajo propone que los resultados constituyan un instrumento de ayuda en la toma de decisiones durante la fase de diseño, es por eso que se entiende necesario establecer su alcance en función de los objetivos de la evaluación de cada caso en particular o si se desea también definir criterios válidos y razonables para la comparación de casos.

El caso 1 se centra en el estudio de los impactos producidos por la envolvente de una vivienda, de modo que la organización de los resultados busca obtener comparativamente los impactos producidos por cada uno de los materiales BIM durante las fases del ciclo de vida. La comunicación de los resultados también busca comparar la incidencia de los transportes de materiales, en la utilización de materiales locales frecuentes con males prestaciones desde el punto de vistas de térmico y materiales menos frecuentes de origen extra-regional con mejores prestaciones desde el punto de vista térmico.

Los gráficos desarrollados buscan por otra parte poner en evidencia la relación que existe entre los impactos producidos por el consumo de energía

durante la fase operacional, y los impactos incorporados que tienen los materiales utilizados en fase de construcción (incluyendo los módulos A1-A2-A3 y A4).

El caso 2 busca analizar comparativamente 3 viviendas construidas con tecnologías diferentes, y a partir de la aplicación de criterios de diseño y construcción diferentes. Se persigue visualizar como afecta a los impactos ambientales que produce una vivienda la prevalencia de criterios económicos, criterios centrados en la eficiencia energética y el uso de materiales renovables como la madera, y criterios centrados en el diseño arquitectónico que privilegian el uso de la iluminación y ventilación natural. En tal sentido, la organización de los resultados al igual que en el caso 1 busca comprar a través de las categorías de impacto seleccionadas, la incidencia de los diferentes materiales utilizados y los transportes que los afectan, en los impactos producidos durante el ciclo de vida de la vivienda. Del mismo modo, los resultados buscan evidenciar la relación entre los impactos producidos por el consumo de energía en fase operacional y los impactos incorporados.

### 3.2.4.1 Impactos caso 1

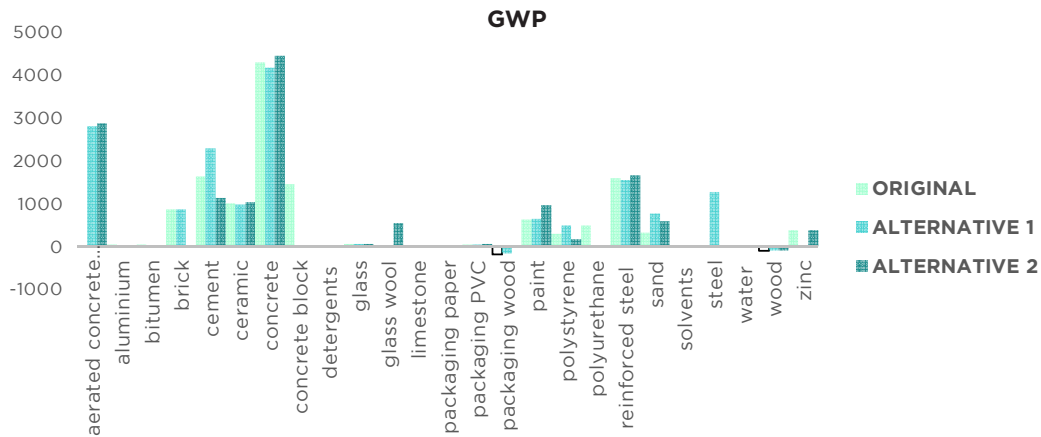
La aplicación de la metodología propuesta ha permitido obtener los siguientes datos para el caso 1, expresados de acuerdo con los módulos de información definidos por la norma EN 15978 (EN, 2011).

**Tabla 14** Resumen de resultados obtenidos tras la evaluación del caso 2.  
(Fuente: elaboración propia)

	ACV módulos de información	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	FWE (points)	HT (points)	ODP (kg CFC 11 eq.)
<b>Original</b>	<b>A1/A2/A3</b>	8,006E+03	1,142E+03	2,110E+03	6,644E-04
	<b>A4</b>	4,814E+03	2,705E+02	9,891E+02	5,732E-04
	<b>A5</b>	6,691E+02	1,621E+01	1,483E+02	5,739E-05
	<b>B2/B3/B4/B5</b>	6,096E+03	1,179E+03	1,536E+03	9,652E-04
	<b>B6</b>	4,555E+04	3,054E+03	2,382E+04	4,714E-03
	<b>C1</b>	4,910E+02	3,359E+01	2,620E+02	5,185E-05
	<b>C2</b>	1,121E+03	6,294E+01	2,308E+02	1,318E-04
	<b>C4</b>	2,134E+03	6,428E+02	3,800E+02	2,133E-04
<b>Alternativa 1</b>	<b>A1/A2/A3</b>	1,046E+04	2,157E+03	4,169E+03	7,616E-04
	<b>A4</b>	5,517E+03	3,101E+02	2,152E+03	6,557E-04
	<b>A5</b>	7,438E+02	4,233E+01	2,017E+02	7,589E-05
	<b>B2/B3/B4/B6</b>	5,800E+03	1,180E+03	1,532E+03	9,724E-04
	<b>B6</b>	3,780E+04	2,534E+03	1,977E+04	3,911E-03
	<b>C1</b>	5,356E+02	3,665E+01	2,858E+02	5,656E-05
	<b>C2</b>	1,029E+03	5,773E+01	2,117E+02	1,209E-04
	<b>C4</b>	2,847E+03	5,410E+02	7,982E+02	2,944E-04
<b>Alternativa 2</b>	<b>A1/A2/A3</b>	9,640E+03	1,246E+03	2,081E+03	9,251E-04
	<b>A4</b>	4,746E+03	2,659E+02	9,844E+02	5,650E-04
	<b>A5</b>	6,478E+02	4,758E+01	1,592E+02	6,197E-05
	<b>B2/B3/B4/B5</b>	3,934E+04	2,638E+03	2,057E+04	4,071E-03
	<b>B6</b>	3,934E+04	2,638E+03	2,057E+04	4,071E-03
	<b>C1</b>	4,910E+02	3,359E+01	2,620E+02	5,185E-05
	<b>C2</b>	1,121E+03	6,294E+01	2,308E+02	1,318E-04
	<b>C4</b>	1,564E+03	6,111E+02	1,837E+02	1,234E-04

Los gráficos que se incluyen a continuación buscan aportar un mayor grado de detalle a los datos incluidos en la Tabla 15, así como también ayudar al diseñador a identificar los impactos que producen los materiales elegidos durante su ciclo de vida.

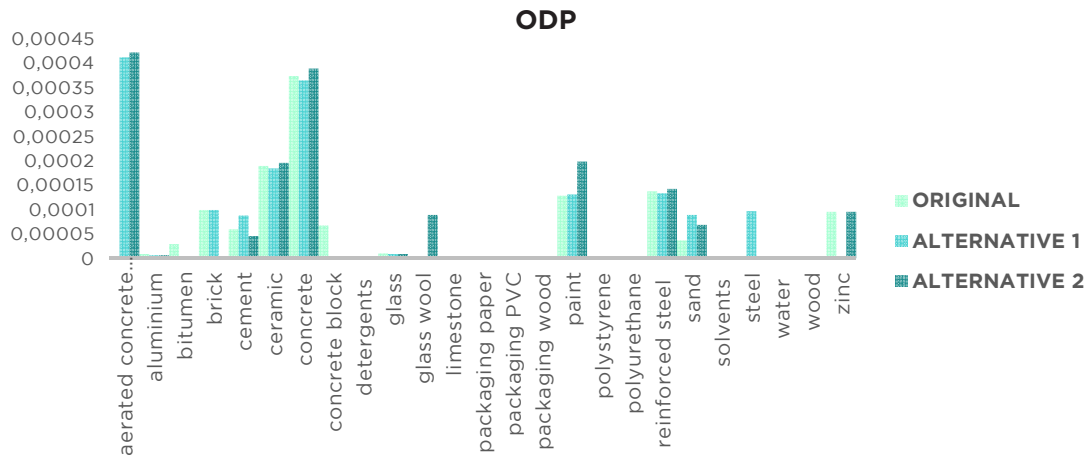
Las Figuras 11, 12, 13 y 14, muestran los impactos incorporados (incluyendo las fases A1-A2-A3 y A4) que producen los materiales que se han elegido en cada una de las alternativas.



**Figura 11** Resultados obtenidos para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría GWP (kg CO<sub>2</sub> eq.). (Fuente: elaboración propia)

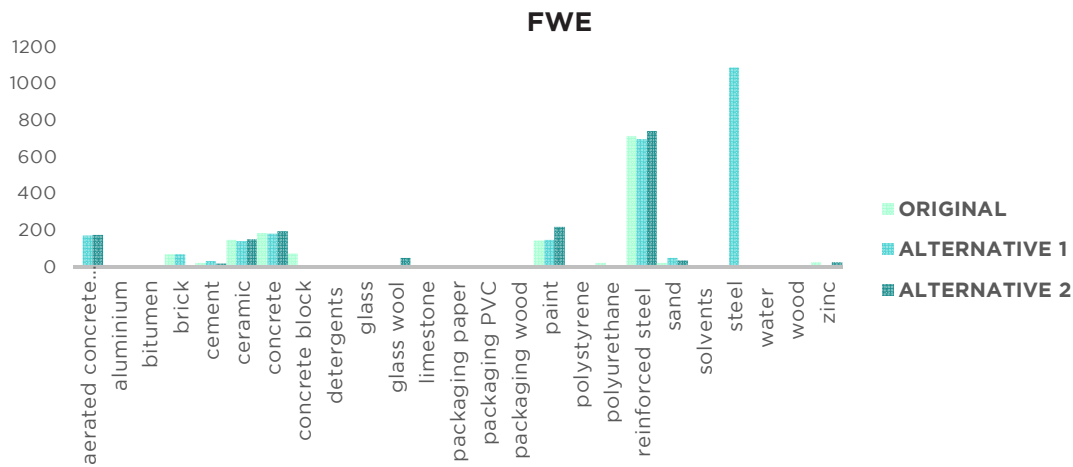
Teniendo en cuenta la Figura 11, de los materiales incluidos en las tres alternativas resulta decisivo el contenido de hormigón a la hora de cuantificar los impactos que produce el GWP.

Por otra parte, el uso de bloques de hormigón celular (*aerated concrete blocks*) también ha hecho incrementar impactos incorporados en las Alternativas 1 y 2.

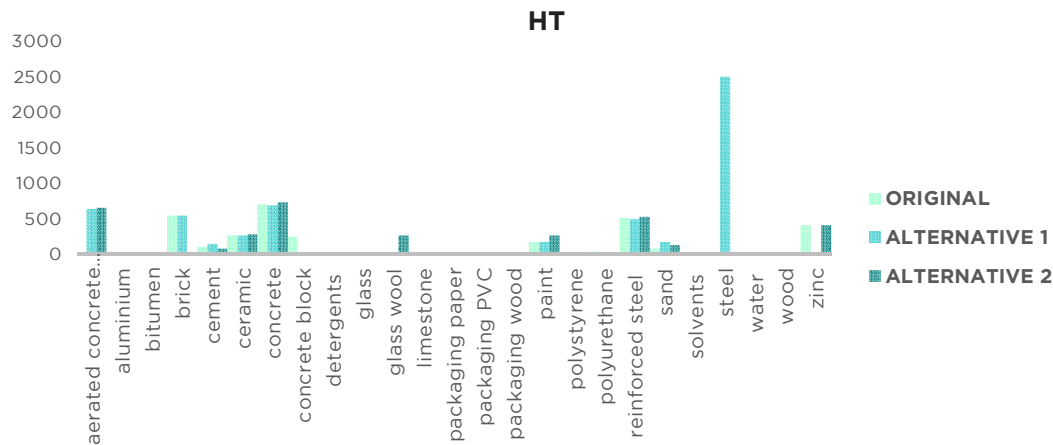


**Figura 12** Resultados obtenidos para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría ODP (kg CFC 11 eq.). (Fuente: elaboración propia)





**Figura 13** Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría FWE (points).  
(Fuente: elaboración propia)



**Figura 14** Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría HT (points).  
(Fuente: elaboración propia)

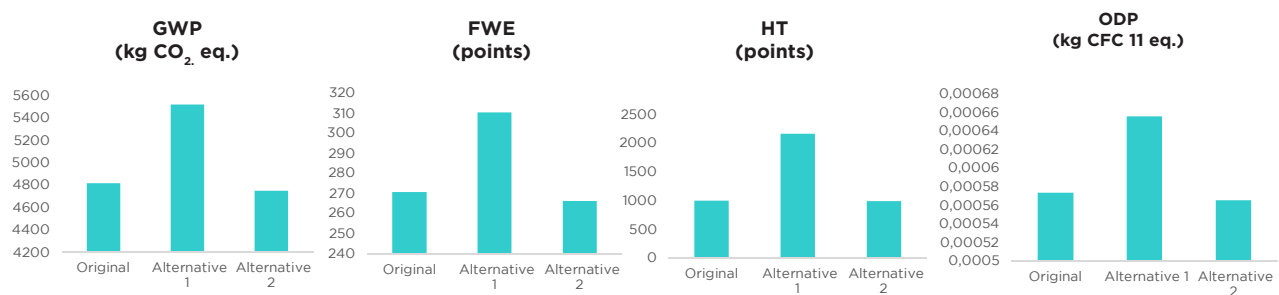


Figura 15 Comparación de impactos derivados del transporte de la “cuna a la puerta” (A4) que producen las alternativas consideradas. (Fuente: elaboración propia)

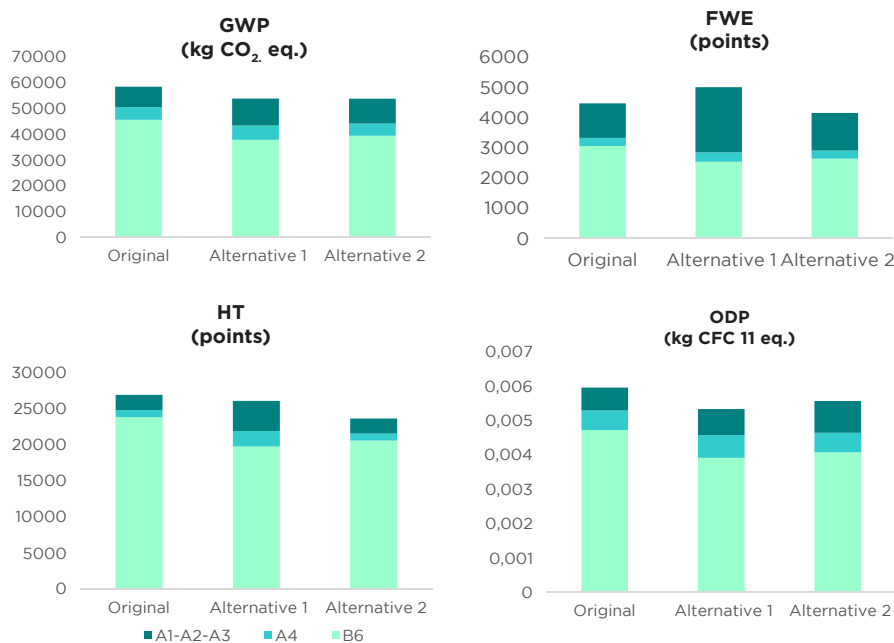


Figura 16 Comparación de impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) y energía operacional utilizada (B6). (Fuente: elaboración propia)

La Figura 16 muestra la relación existente entre los impactos derivados de los transportes a la obra. Se demuestra que no es posible establecer una relación proporcional entre las categorías evaluadas y las soluciones comparadas, ya que depende de varios factores tales como: las distancias consideradas, el peso de material transportado, el tipo de vehículo utilizado, el combustible utiliza-

do durante el transporte y su rendimiento.

A través de la figura 16 es posible analizar la relación existente entre los impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) de la suma de todos los materiales que componen cada una de las alternativas y los impactos que produce el edificio en fase operacional (B6).

### 2.4.4.2 Impactos caso 2

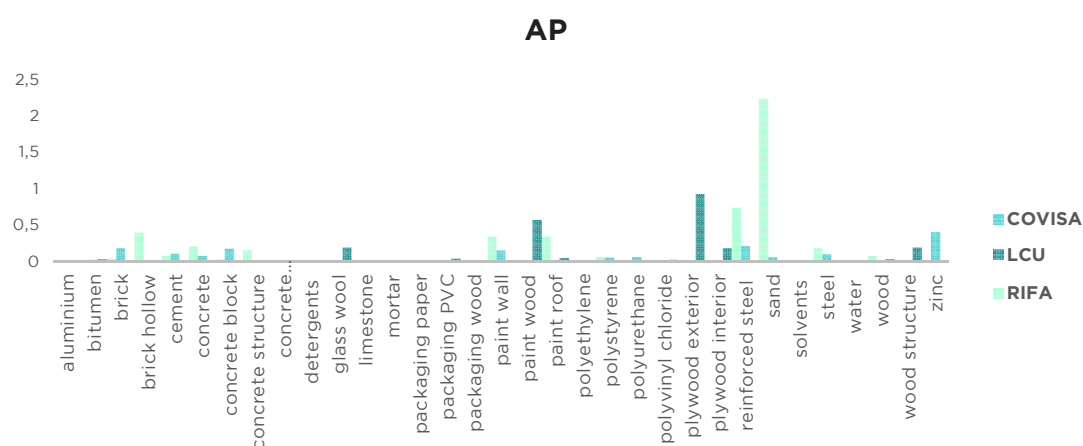
La aplicación de la metodología propuesta ha permitido obtener los siguientes datos para el caso 2, expresados de acuerdo con los módulos de información definidos por la norma EN 15978 (EN, 2011).

**Tabla 15** Resumen de resultados obtenidos tras la evaluación del caso 2.  
(Fuente: elaboración propia)

	ACV módulos de información	AP (kg SO <sub>2</sub> eq.)	GWP (kg CO <sub>2</sub> eq.)	EP (kg (PO <sub>4</sub> ) <sup>3</sup> eq.)	FWE (points)	HT (points)	ODP (kg CFC 11 eq.)
"RIFA"	A1/A2/A3	2,045E+00	5,202E+02	3,638E-01	1,124E+02	1,463E+02	4,885E-05
	A4	2,173E+00	3,203E+02	3,527E-01	1,801E+01	6,565E+01	3,829E-05
	A5	2,101E-01	1,424E+02	2,062E-02	1,477E+00	1,152E+01	2,279E-06
	B2/B3/B4/B5	5,813E-02	2,494E+01	4,880E-03	9,199E+00	3,778E+00	3,157E-06
	B6	9,002E-02	9,249E+00	8,836E-03	6,328E-01	1,153E+01	9,766E-07
	C1	8,024E-02	1,660E+01	1,768E-02	1,136E+00	8,860E+00	1,753E-06
	C2	1,321E-02	5,340E+01	1,355E-03	2,997E+00	1,099E+01	6,277E-06
	C4	9,345E-02	1,208E+02	1,904E-02	5,838E+01	1,076E+01	9,863E-06
"COVISA"	A1/A2/A3	1,360E+00	2,414E+02	2,163E-01	4,851E+01	9,061E+01	2,218E-05
	A4	3,157E-01	4,577E+01	5,095E-02	2,585E+00	9,282E+00	5,576E-06
	A5	1,279E-01	6,480E+01	7,368E-03	2,169E+01	1,279E+01	7,202E-06
	B2/B3/B4/B6	2,137E-02	6,793E+00	4,826E-03	2,227E+00	1,196E+00	8,257E-07
	B6	1,311E-01	1,375E+01	1,287E-02	9,217E-01	7,188E+00	1,422E-06
	C1	1,497E-01	1,538E+01	1,470E-02	1,052E+00	8,208E+00	1,624E-06
	C2	2,187E-01	3,299E+01	3,588E-02	1,851E+00	6,791E+00	3,878E-06
	C4	2,008E-01	5,133E+01	3,242E-02	2,130E+01	9,214E+00	5,816E-06
"LCU"	A1/A2/A3	1,863E+00	-2,681E+01	3,614E-01	2,916E+01	6,457E+01	3,473E-05
	A4	2,542E-01	3,794E+01	4,140E-02	2,124E+00	7,871E+00	4,456E-06
	A5	9,617E-02	8,717E+01	9,440E-03	4,625E+01	7,815E+00	1,719E-06
	B2/B3/B4/B5	9,207E+00	1,802E+01	1,738E-02	7,098E+00	3,092E+00	2,393E-06
	B6	3,821E-02	7,144E+00	1,803E-02	1,322E+00	7,643E+00	1,365E-06
	C1	7,397E-02	7,600E+00	7,261E-03	5,200E-01	4,056E+00	8,026E-07
	C2	3,013E-02	4,544E+00	4,943E-03	2,550E-01	9,354E-01	5,341E-07
	C4	2,375E-02	7,729E+01	3,569E-03	4,557E+01	2,543E+00	6,757E-07

Los gráficos que se muestran a continuación buscan aportar un grado mayor de detalle a los datos incluidos en la Tabla 15, a los efectos de poder ayudar al diseñador a identificar dentro de las soluciones de viviendas evaluadas, los impactos que producen los materiales elegidos durante su ciclo de vida, así como también a identificar cuáles

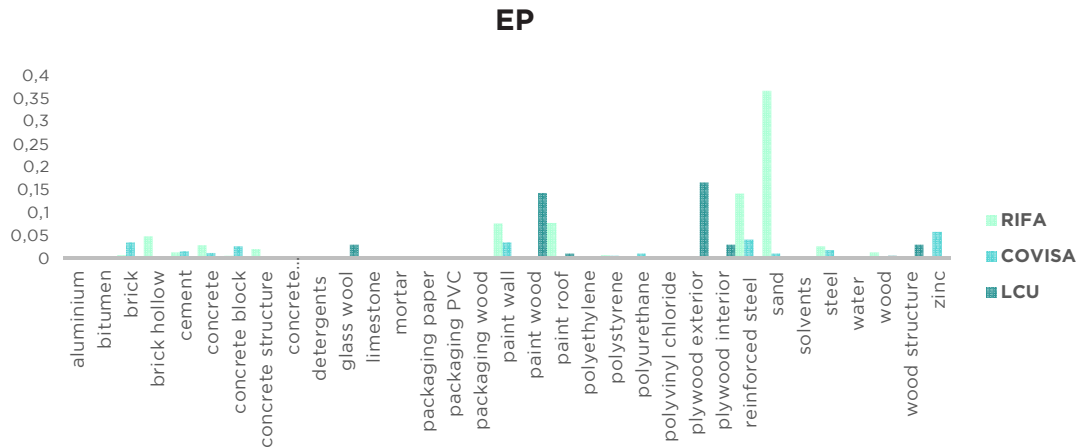
pueden ser las estrategias de mejora u optimización de la distribución funcional de las mismas. Las Figuras 17, 18, 19, 20, 21 y 22 muestran los impactos incorporados (incluyendo las fases A1-A2-A3 y A4) que producen los materiales que se han elegido en cada una de las viviendas.



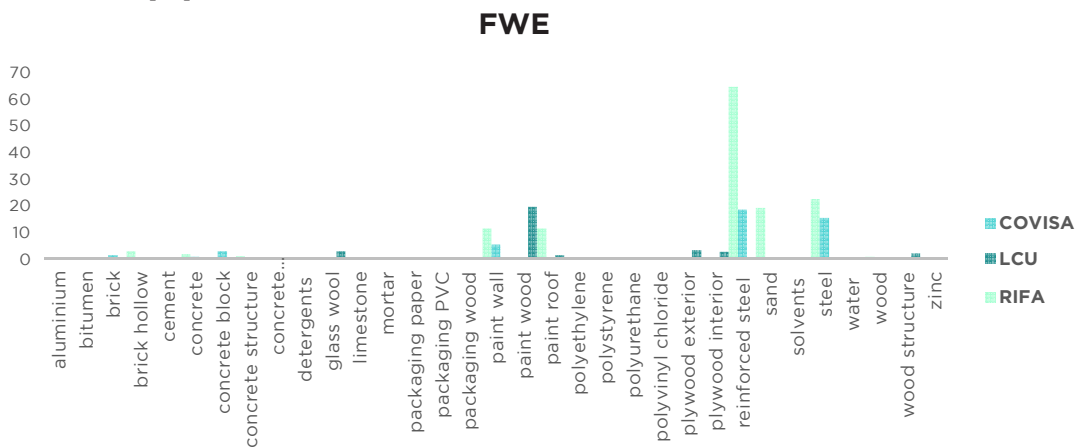
**Figura 17** Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría AP (kg SO<sub>2</sub> eq.) (Fuente: elaboración propia)



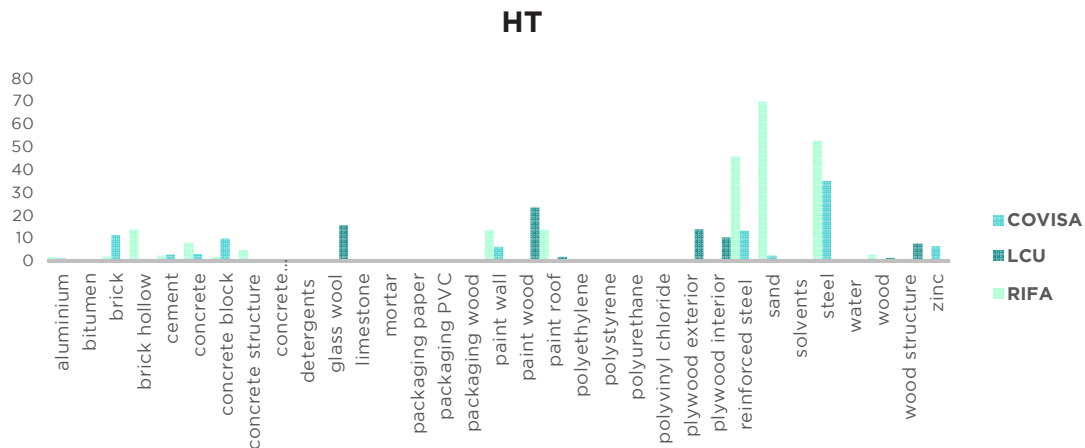
**Figura 18** Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría GWP (kg CO<sub>2</sub> eq.). (Fuente: elaboración propia)



**Figura 19** Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría EP (kg (PO<sub>4</sub>)<sup>3</sup>eq.) (Fuente: elaboración propia)

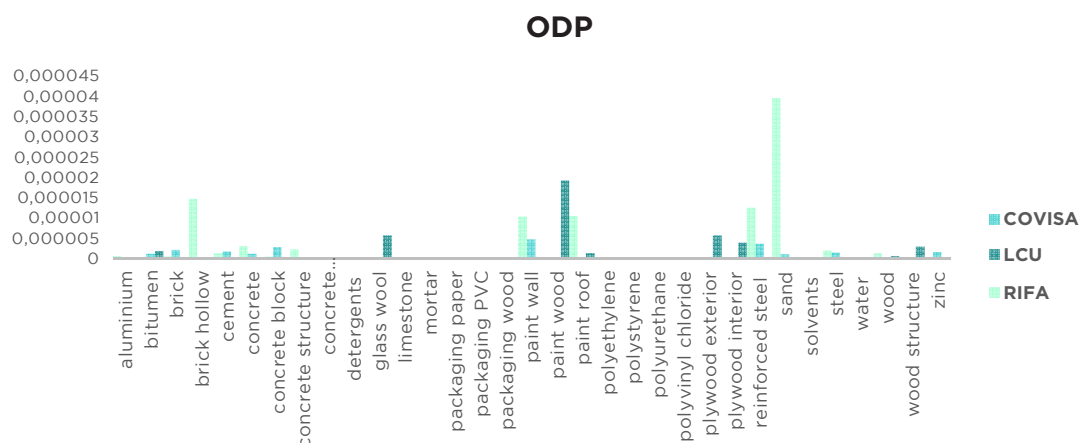


**Figura 20** Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría FWE (points) (Fuente: elaboración propia)



**Figura 21** Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría HT (points) (Fuente: elaboración propia)





**Figura 22** Resultados obtenido para impactos incorporados (A1-A2-A3-A4) para la categoría ODP (kg CFC 11 eq.) (Fuente: elaboración propia)



**Figura 23** Comparación de impactos derivados del transporte de la “cuna a la puerta” (A4) que producen las alternativas consideradas. (Fuente: elaboración propia)

La Figura 23 muestra los impactos que se produce en el módulo A4 de información, correspondiente al transporte de materiales desde la fábrica a la obra (de la “cuna a puerta”). En ese sentido se puede visualizar que comparativamente 1 m<sup>2</sup> de la

vivienda “RIFA” produce mayores impactos que el resto de los casos analizados., principalmente debido a que una mayor cantidad de material por metro cuadrado ha sido necesario utilizar durante su construcción.

### 2.4.5 Discusión de resultados obtenidos

La discusión de los resultados se centra en analizar en primer lugar la capacidad de la metodología desarrollada para identificar los impactos producidos por los casos de estudio durante las diferentes fases del ciclo de vida, y las potencialidades de éstos para orientar la toma de decisiones. Por otra

parte, se enumeran algunas de las limitaciones identificadas en el proceso de verificación y aplicación a los casos de estudio. También se aportan recomendaciones y desafíos identificados de cara a la integración de herramientas BIM y ACV.

#### 2.4.5.1 Interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo con las fases del ciclo de vida

Ha sido posible identificar cuáles han sido los mayores impactos producidos por las viviendas durante su ciclo de vida. Los resultados han sido organizados de acuerdo con cada una de las fases especificadas según la normativa de referencia (EN, 2012, 2011).

Para el caso 1, en el que se analizan los impactos totales producidos por la envolvente de la vivienda durante toda su vida útil, es posible comprobar que los mayores impactos ambientales se producen mayoritariamente durante la fase de consumo de energía operacional (B6). Los gráficos y tablas desarrolladas (Figura 16 y Tabla 15) evidencian que estos impactos están íntimamente ligados con la eficiencia térmica de los materiales utilizados en la envolvente de la vivienda. Por otra parte, se demuestra que esta metodología permite contrastar de forma sencilla 3 alternativas constructivas durante la fase de diseño del edificio.

Para el caso 2, en el que se analizan 3 soluciones de vivienda utilizando diferentes materiales y tecnologías constructivas utilizando como unidad de referencia el m<sup>2</sup> de superficie útil durante un período de 1 año, se puede comprobar que los mayores impactos se producen durante la fase de producto. Se ha demostrado que los impactos de transporte resultan también significativos. En este sentido, cabe destacar que los mayores impactos derivados del transporte se deben al volumen de material transportado, es decir que la vivienda que ha utilizado más volumen de material por metro cuadrado genera mayores impactos en el transporte, esto también puede deberse al tipo de vehículo mayormente utilizado (camión de 16 toneladas), dado que no resultan los más eficientes en términos de la carga transportada y del tipo de combustible utilizado.

#### 2.4.5.2 Interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo con los principales materiales empleados

Los resultados obtenidos han permitido identificar los materiales que mayores impactos producen durante el ciclo de vida, permitiendo aproximarse a los impactos que se producen en función de las cantidades estimadas de materiales presentes en el edificio.

De acuerdo con los resultados contenidos en las figuras 11, 12, 13 y 14 se demuestra que el acero en relación a otros materiales es el que produce mayores impactos en las categorías de HT y FWE. Mientras que en las categorías correspondientes a GWP y ODP se le otorgan mayores impactos al

uso de bloques de hormigón celular (*aerated concrete blocks*). En ese caso la alternativa 1 sería la que sumaría la mayor cantidad de materiales que producen los mayores impactos en fase de fabricación y transporte a la obra (de la “cuna a la puerta”).

La Figura 23 muestra los impactos que se produce en el módulo A4 de información, correspondiente al transporte de materiales desde la fábrica a la obra (de la “cuna a puerta”). En ese sentido se puede visualizar que comparativamente 1 m<sup>2</sup> de la vivienda “RIFA” produce mayores impactos que el resto de los casos analizados, principalmente debido al mayor volumen de material utilizado y su organización funcional y la distribución de la vivienda. Modelos de vivienda más compactos producen impactos senciblemente menores, tales como COVISA y LCU.

Para el caso 2, resulta evidente la influencia de la madera en la obtención de mejores resultados a nivel de las categorías de impacto analizadas. Una de las principales razones de esto, se debe al reducido porcentaje de volumen de material utilizado y superficie útil de la vivienda. Analizando esta relación en los 3 casos de estudio, se obtiene que “LCU” tiene una relación volumen/superficie útil de 0.68 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> mientras que “COVISA” tiene una relación de 1.125 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup> y “RIFA” de 1.4879 m<sup>3</sup>/m<sup>2</sup>.

Por otra parte, se ha podido identificar cuál de los casos de estudio utiliza mayor cantidad de agua durante los procesos de construcción y uso para mantenimiento de los materiales y componentes, coincidiendo con los casos que utilizan obra de fábrica y hormigón.

#### 2.4.5.3 Interpretación de los resultados obtenidos de acuerdo con las categorías de impactos

Los resultados obtenidos demuestran la disparidad existente entre las diferentes categorías de impactos y los casos de estudio. Para el caso 1 los resultados arrojan algunas claves sobre la relación de los impactos derivados de la fase de fabricación, los impactos derivados del transporte de los materiales y los impactos derivados del consumo energético en fase operacional. Estos resultados resultan relevantes a la hora de elegir materiales en función de sus prestaciones, los impactos de fabricación, y los impactos derivados del transporte.

Para el caso 1, si se comparan los impactos derivados de las fases A1-A2-A3-A4, con los que se producen en la fase de consumo energético ope-

racional, se observa que la Alternativa 1 es la que menores impactos totales produce (Figura 16).

Para el caso 2, el análisis de resultados de los impactos totales producidos por las viviendas evaluadas, revela que el caso que mayores impactos produce en la totalidad de las categorías consideradas por unidad de referencia es la casa “RIFA”. Esto se debe principalmente a su alto contenido de cemento, hormigón, acero y pinturas, así como también porque resulta la que más cantidad de materiales por metro cuadrado útil utiliza. Por su parte la que menores impactos ha registrado es la LCU, destacándose los valores especialmente bajos en las categorías de AP, GWP y HT.

#### 2.4.5.4 Interpretación de los resultados obtenidos como instrumentos de evaluación en fases de diseño

La organización del flujo de datos, ha permitido clasificar la información referente a los impactos que produce el edificio de forma automática, ayudando a identificar las fases en la que se producen los mayores impactos, los materiales que produ-

cen mayores impactos, los impactos derivados de las etapas de transporte, uso y etapas de fin de vida.

#### 2.4.5.5 Limitaciones de los resultados obtenidos y de aspectos operativos de la metodología propuesta

Mediante la verificación de la aplicación de la metodología ha sido posible identificar determinadas limitaciones desde el punto de vista operativo de la propia metodología, así como también de las herramientas que se ha utilizado.

Desde el punto de vista de la integración de herramientas BIM en la aplicación del ACV ha sido posible comprobar que la cuantificación, de ciertos materiales y componentes, no se realiza de forma automática. Esto se verifica en componentes y objetos BIM, tales como escaleras, cerchas, ventanas y puertas, los cuales ha sido necesario cuantificarlos de forma semi-automática.

También se han verificado limitaciones derivadas del nivel de desarrollo utilizado para la cuantificación de elementos estructurales de hormigón armado. Estos elementos no han sido definidos con exactitud durante la fase de diseño, dado que es información que se desarrollará en fase de proyecto (LOD 400), aun cuando resulta relevante en la evaluación reconocer diferencias entre pilares, forjados, vigas y cimentaciones, en relación a los porcentajes de acero y hormigón. Debido a que el nivel de desarrollo del modelo asumido es de LOD300, no se puede cuantificar con exactitud

el contenido de acero de los elementos estructurales. La metodología propuesta ha establecido porcentajes estimados para cuantificar este tipo de elementos.

Por otra parte, a nivel operativo la metodología propuesta sólo permite comparar un número limitado de materiales BIM (definidos por el usuario), y asociado a un número limitado de información complementaria (contenida en las Fichas de materiales). Dado que los elementos constructivos, materiales y tecnologías constructivas presentan ciertas similitudes es posible establecer un grupo de materiales frecuentes para los cuales se verifican condiciones similares. En ese sentido se recomienda estandarizar el flujo de información y la cantidad de elementos considerados del edificio, así como también el desarrollo de escenarios e hipótesis de ciclo de vida.

La metodología sólo se ha verificado en 1 tipología de viviendas (vivienda unifamiliar), construidas mediante determinadas técnicas constructivas y en un contexto determinado (Uruguay), siendo necesario que pueda ser verificado y adaptado a otros contextos y sistemas constructivos.

#### 2.4.5.6 Recomendaciones para el desarrollo de herramientas y aplicaciones informáticas de evaluación ambiental de edificios residenciales que integren BIM-ACV en fases de diseño

La metodología desarrollada se acerca a un proceso semi-automático que permite llevar adelante la evaluación del comportamiento ambiental de los edificios. Se desarrolla una estructura de datos y flujo de información que permite la interacción con el usuario y lo ayuda a tomar decisiones durante el proceso de diseño. En este sentido es posible establecer algunas claves en las que se podría seguir avanzando en el desarrollo de este tipo de instrumentos.

Ante el incipiente desarrollo de herramientas informáticas que permiten llevar adelante el procedimiento de aplicación del ACV a partir de modelos BIM (y viceversa) durante la fase de diseño, se enumeran algunas consideraciones a tener en cuenta, especialmente aplicadas a tipologías de viviendas unifamiliares:

- Se ha podido constatar que reducir la cantidad de datos que ingresa el usuario durante el proceso de evaluación, para reducir los esfuerzos en la adquisición de los mismos, va en detrimento de los resultados y su fiabilidad. En ese sentido es importante que el usuario conozca y pueda modificar de acuerdo con las características del proyecto los datos referidos al edificio durante su ciclo de vida. Se debe evidenciar la definición de los escenarios del ciclo de vida del edificio asumidos (ej. la frecuencia de mantenimiento, limpieza, reposición, los modelos de asignación del transporte, la cantidad de residuos generados y los escenarios de fin de ciclo de vida, entre otros) y posibilitar que estos escenarios puedan ser adaptados a las características del proyecto, a los efec-

tos de acercarse a situaciones más reales y que permitan ir más allá de comparar EPDs o datos genéricos sobre impactos de fabricación producidos por los materiales de construcción.

- La estructura de datos de entrada y de salida debe ayudar y posibilitar al usuario a tomar mayor conciencia sobre las fases, módulos de información y procesos que se desarrollan durante el ciclo de vida del edificio, fomentando el “life cycle-thinking”. Es preciso trabajar hacia el desarrollo de instrumentos de diseño que ayuden al diseñador a elegir materiales y componentes, por ejemplo, de acuerdo con criterios de impactos producidos tanto en fase de producción, construcción, mantenimiento, transporte, mediante por ejemplo la geolocalización de puntos de producción y suministro.

- La comunicación de los resultados debe ser clara y contener categorías de impacto que resulten relevantes para el contexto y el objetivo de la evaluación. Sin perjuicio que este debería ajustarse lo más que se pueda a las normas 15978 (EN, 2011) y 15804 (EN, 2012), para poder constituir un instrumento de comparación que pueda ser representativo. Por otra parte, es importante que la comunicación de los resultados también incluya los impactos producidos por cada material, para identificar claramente mayores y menores impactos que producen estos materiales, y que la estructura de datos de salida se adapte a los datos de entrada (“inputs”) del software BIM para poder ser modificado de forma rápida y sencilla por el usuario. También resulta relevante señalar que el

formato de salida de los resultados debe ayudar al usuario a comprender, comparar y otorgar sentido a la información que se está mostrando.

-Por otra parte, es preciso adaptar el proceso de cuantificación de objetos BIM que puedan adaptarse a las unidades en las que se aplica la metodología de ACV, por ejemplo, ventanas, puertas y escaleras, o en su defecto que puedan adaptarse a las unidades en las que se establecen o definen las DAPs de esos productos. Se recomienda profundizar la optimización de la cuantificación de estos componentes BIM hacia la automatización

de su incorporación en la estructura de datos de aplicación del ACV.

-La interoperabilidad entre los softwares constituye uno de los grandes desafíos de cara a la integración de herramientas BIM-ACV. Es preciso trabajar en mejorar el intercambio de datos entre entornos de trabajo, para lograr un flujo de información automático que sólo dependa de las decisiones adoptadas por el usuario durante el ciclo de vida del edificio.

#### **3.4.5.7 Herramienta BIM based LCA single-family houses beta 1.0**

Este trabajo contiene la herramienta BIM-based LCA single-family houses versión beta, desarrollada en JAVA, como una alternativa de interfaz de comunicación de los resultados. El desarrollo de la herramienta busca optimizar el funcionamiento de los ficheros y acercarle al usuario una interfaz más amigable y sencilla que permita comparar los casos de estudio analizados. La versión que se adjunta incorpora los resultados obtenidos para el caso 1.

En el Anexo 4 se incorpora el manual de instalación de la misma. En el CD que contiene este documento se encuentra también la versión ejecutable de dicha herramienta.



# Capítulo 3

---

## Capítulo 3. Conclusiones

- 3.1 Conclusiones sobre el nivel de cumplimiento de los objetivos.
- 3.2 Conclusiones sobre el desarrollo de la propuesta metodológica
- 3.3 Conclusiones sobre los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología al contexto de Uruguay.
- 3.4 Propuesta de futuras líneas de investigación.



### 3.1 Conclusiones sobre el nivel de cumplimiento de los objetivos

A través del desarrollo de la presente Tesis ha sido posible profundizar en la elaboración de herramientas que ayuden a evaluar el comportamiento ambiental de edificios residenciales durante la fase de diseño. Esto ha implicado la identificación de estrategias de simplificación utilizadas en la aplicación del ACV en este tipo de edificios, la identificación de estrategias de integración de herramientas BIM en la aplicación del ACV, el diseño de una propuesta metodológica que integre ambas herramientas y la verificación de su aplicación en la tipología de viviendas unifamiliares localizadas en un contexto de estudio determinado (Uruguay). De modo que de acuerdo con los objetivos específicos establecidos en torno a este trabajo se extraen las siguientes conclusiones:

- La revisión de los casos de estudio más recientes, enfocados en la aplicación del ACV en viviendas unifamiliares, han permitido identificar las estrategias de simplificación más frecuentes utilizadas en esta tipología. Analizadas estas estrategias de acuerdo con las fases del ACV establecidas según la norma ISO 14040 (ISO, 2006a) y las etapas del ciclo de vida definidas por la norma EN 15978 (EN, 2011), se ha podido comprobar que las principales estrategias de simplificación del ACV han estado centradas en reducir los esfuerzos en la recopilación de datos, verificándose la integración de herramientas BIM como una de las estrategias abordadas. Otras de las estrategias ha sido la reducción del número de categorías de impacto consideradas, incorporando las más relevantes según cada caso; la utilización de bases de datos de tipo genéricas o regionales, que puedan aportar datos de calidad y la reducción de los esfuerzos en la clasificación de las categorías de impactos me-

dante el uso de “*ready-made*” métodos de cálculo.

- El análisis de criterios de integración de herramientas BIM y ACV, basado en la revisión de casos de estudio más recientes, ha permitido identificar tres niveles de integración de ambas herramientas. En el primero se verifica el uso de herramientas BIM como instrumento de apoyo durante la recopilación de datos de la fase de Análisis del Inventario del Ciclo de Vida, en el segundo se confirma la integración de datos sobre las características ambientales de los materiales en el entorno BIM, y en el tercero se verifica la integración de ambas herramientas hacia un proceso de retroalimentación, mediante procedimientos semi-automáticos y automáticos. Se verifica que la totalidad de los casos de estudio han sido aplicaciones de tipo diagnóstico “*Screening*” ACV llevadas a cabo en fase de diseño. También ha sido posible verificar la necesidad de mejorar y estandarizar la integración de ambas herramientas.

- El desarrollo de la propuesta metodológica ha posibilitado demostrar el grado de cumplimiento de la metodología de acuerdo con lo definido por la normativa de referencia EN 15978 y EN 15804 (EN, 2012, 2011), justificando en cada uno de los casos las decisiones tomadas y los fundamentos que las sustentan.

- Mediante la verificación experimental de la metodología desarrollada ha sido posible comprobar que puede ser aplicada tanto para evaluar un sistema constructivo del edificio, como para evaluar un edificio completo. Los resultados obtenidos demuestran que, mediante una estructura de datos clara y sencilla para el usuario, se

pueden organizar los datos relativos al ciclo de vida del edificio y estos puedan arrojar información relevante y de ayuda durante el proceso de diseño del edificio.

- Por otra parte, se han podido comparar resultados de 2 estudios diferentes, en los que se evalúa por una parte alternativas de sistemas y materiales para la envolvente de una vivienda, y por otra parte diferentes alternativas de materiales y de distribución funcional y espacial de una misma tipología de viviendas construidas en el contexto de Uruguay.

- Las recomendaciones desarrolladas pretenden orientar tanto a usuarios como a desarrolladores de software, el incipiente desarrollo de aplicaciones informáticas, pudiendo así manejar con mayor fiabilidad las incertidumbres y asegurar la obtención de resultados que puedan guardar un mayor grado de representatividad.

### 3.2 Conclusiones sobre el desarrollo de la propuesta metodológica

La presente Tesis Doctoral ha demostrado las potencialidades de la metodología desarrollada tanto como instrumento utilizado para evaluar diferentes alternativas de envolvente, así como también soluciones estructurales y constructivas para distintos sistemas del edificio. Del mismo modo se han demostrado las potencialidades que encierra esta metodología para poder adaptar los datos sobre el edificio y la forma de vincularlos a diferentes contextos.

También ha sido posible demostrar que esta metodología puede ser utilizada partiendo de cualquier software BIM, que realice de forma automática la cuantificación de los materiales y componentes que integran el edificio. Teniendo en cuenta el tipo de obra considerada y su contexto de aplicación, la metodología también permite controlar aspectos particulares del edificio, tales como por ejemplo las dosificaciones de morteros, cada una de las capas de los materiales y elementos que se incorporan, siendo posible además controlar los escenarios de residuos producidos en cada una de las fases del ciclo de vida y por separado para cada material.

El trabajo desarrollado demuestra también que la utilización de software BIM en la aplicación del ACV permite controlar el flujo de información sobre los materiales y componentes del edificio, y a través del LOD se ayuda a normalizar el flujo de datos sobre materiales que componen el edificio. Por otra parte, el uso de bibliotecas de materiales complementarias también ayuda a complementar los datos relevantes sobre los materiales que componen el edificio durante su ciclo de vida, dado que ayuda en la incorporación de materiales auxiliares, materiales de mantenimiento, sustitución, rehabilitación, reparación, datos sobre transporte, envases, pérdidas de materiales, etc. La estandarización de estos contenidos complementarios puede ayudar a asegurar que el flujo de esta información sea también automático y permita generar mayores garantías a la hora de comparar diversos casos. Al mismo tiempo, ha sido posible controlar el flujo de energía utilizado durante la fase de construcción, y adaptarla de acuerdo con la matriz energética del Uruguay, el contexto de referencias de aplicación.

Finalmente, se espera que el desarrollo de este trabajo pueda ayudar a identificar las potencialidades que encierra la integración de herramientas BIM en la aplicación del ACV y viceversa. Del mismo modo se espera que sirva para fomentar y potenciar el uso de este tipo de herramientas e identificar nuevas alternativas metodológicas, así como también que pueda contribuir en iniciativas internacionales como el IEA EBC Annex 72,

habiendo participado en su fase preparatoria. Así como también contribuya al desarrollo de herramientas que promuevan el “life cycle thinking”, enfoque de análisis de ciclo de vida desde la fase de diseño y concepción de edificios, fiables y transparentes desde el punto de vistas del cumplimiento de la normativa de referencia y de los resultados obtenidos.

### 3.3 Conclusiones sobre los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología al contexto de Uruguay

El trabajo demuestra las potencialidades que tiene la metodología desarrollada para ser aplicada en la tipología residencial más frecuente en el contexto de Uruguay. Se han podido demostrar las posibilidades de comparar diferentes materiales de una misma vivienda unifamiliar y diferentes configuraciones espaciales y materiales para una misma tipología (vivienda unifamiliar).

Para el caso 1 de aplicación los resultados demuestran que la Alternativa 1 (envolvente de bloque de hormigón celular y ladrillo y cubierta de panel sandwich), a pesar de ser la alternativa que mayores impactos en transporte e impactos incorporados presente, resulta ser a nivel general, de acuerdo con las categorías de impacto consideradas, la que menores impactos totales produce.

Los resultados obtenidos han permitido comparar los impactos producidos por materiales “menos frecuentes” no disponibles a escala local (bloques de hormigón celular), con materiales locales utilizados con mayor frecuencia (bloques de hormigón convencionales), a través de la comparación de los impactos de fabricación, transporte hasta la obra

y los impactos producidos durante la fase operacional.

Para el caso 2 ha sido posible demostrar la potencialidad que encierra el uso de la madera en la construcción en este contexto, especialmente hacia esta tipología edilicia, dado que a nivel general ha sido la que menores impactos ha registrado de forma global, teniendo en cuenta las categorías de impacto evaluadas (AP, EP, GWP, FWE, HT). Por otra parte, se verifica que la vivienda estudiada que menor volumen de materiales utilizados para obtener una mayor superficie construida es el caso de la vivienda en madera, pudiéndose demostrar que se trata de la solución constructiva que mejor optimiza la superficie útil con el volumen de materiales y eficiencia energética de la envolvente.

Por otra parte, a nivel general los resultados demuestran que los impactos referidos al transporte (especialmente módulo A4) en este contexto resultan significativos. En el entendido que una de las estrategias para reducir estos impactos, es aumentar el consumo de materiales locales y re-

gionales en detrimento de los que deben recorrer grandes distancias, el análisis de los datos obtenidos permite demostrar que proporcionalmente se producen mayores impactos en el transporte de pequeña escala, el cual se produce generalmente en pequeños camiones propulsados por combustibles fósiles. Estos impactos podrían reducirse de forma significativa mediante el uso de medios de transporte más sostenibles, tales como el tren, el uso de vehículos eléctricos o propulsados por biocombustibles.

Al mismo tiempo, teniendo en cuenta las características del contexto de aplicación, y especialmente debido a los avances producidos en la reducción de los impactos ambientales derivados del consumo energético de los edificios en fase de uso, (mix energía eléctrica casi 100% proviene de

fuentes renovables), se demuestra que este tipo de herramientas presenta potencialidades para ser aplicadas en este contexto. Dado que puede ayudar a reducir otros impactos producidos por los edificios durante su ciclo de vida, orientando en la toma de decisiones sobre el origen de los materiales utilizados, los impactos de fabricación, los impactos producidos durante la etapa de uso y los impactos producidos en etapa de fin de vida de componentes o productos.

Para ello, resulta clave el desarrollo de bases de datos u otros instrumentos que permitan mejorar la comunicación de las características ambientales de los materiales utilizados en el contexto de Uruguay.

### 3.4 Propuesta de futuras líneas de investigación

Este trabajo abre las siguientes posibilidades de seguir avanzando en esta temática:

-Se ha podido demostrar al igual que otros antecedentes sobre el tema, la limitada cantidad de datos contenidos en el entorno BIM de cara a la aplicación del ACV. La metodología desarrollada y las aplicaciones en casos de estudio ha posibilitado desarrollar una estructura que pueda organizar y complementar la información necesaria de cara a la aplicación del ACV en una tipología determinada (viviendas unifamiliares) en un contexto determinado (Uruguay). Por otra parte se verifica la escasa existencia de datos am-

bientales y bases de datos de procesos unitarios en el contexto de Uruguay. De modo que esto evidencia la necesidad de aumentar el desarrollo de bases de datos y estructuras de organización de datos sobre el ciclo de vida de los materiales de construcción adaptadas a este contexto, como forma de acercar a diseñadores y técnicos al uso habitual de herramientas de ayuda en la toma de decisiones que incorporen la evaluación cualitativa de los impactos ambientales que producen los edificios.

-Se recomienda perfeccionar y fomentar el desarrollo de nuevas aplicaciones informáticas que permitan aplicar el ACV de forma automática a partir de modelos BIM en las fases de diseño. Pudiendo ser extensible a otras tipologías edilicias, así como también hacia otros sistemas constructivos más allá de los más frecuentes. En este sentido se hace especial hincapié en trabajar sobre la comunicación de los resultados, que permitan orientar en la toma de decisiones durante el proceso de diseño.

-El trabajo desarrollado explora las potencialidades de las herramientas “*life cycle thinking*” (enfoque de ciclo de vida) como instrumento de evaluación durante la fase de diseño del edificio. Se propone que futuros trabajos de investigación se centren en modelizar y estandarizar algunos patrones de comportamiento sobre escenarios de mantenimiento, reparación, rehabilitación y sustitución que ayudarían a poder comparar resultados, facilitando su aplicación en otros casos de estudio.

-La metodología desarrollada explora su aplicación vinculada al caso particular de un determinado software BIM, aunque se desarrolla de forma separada del software. Se recomienda verificar la aplicabilidad de la metodología desarrollada en diferentes softwares BIM a los efectos de realizar los ajustes correspondientes.

-Se propone aumentar las posibilidades de utilización de este tipo de herramientas que asocian información del edificio con modelos BIM, hacia otros aspectos derivados del ciclo de vida desde el punto de vista social (*SLCA*) y económico del edificio (*LCC*).

-La metodología desarrollada abre caminos para estudiar la posibilidad de incluir escenarios de tratamiento y recuperación de residuos, adaptados a contextos determinados e incluir estas variables dentro de los parámetros de diseño del edificio, como forma de promover la reutilización y el reciclaje de materiales. Esto deberá contar con una base que identifique puntos de reciclaje en el territorio, para posibilitar conectarse con la localización del edificio. Previamente deberá confirmarse las condiciones en las que se desarrollan estas actividades, manteniendo condiciones de higiene y seguridad para los operarios.

-Se proponer la elaboración de protocolos de desarrollo de este tipo de herramientas que otorguen a usuarios y desarrolladores, garantías de transparencia y fiabilidad en relación al flujo de información de entrada y de salida, así como también de las hipótesis y escenarios de ciclo de vida desarrolladas.



## Bibliografía

- Abdelalim, A., O'Brien, W., Shi, Z., 2015. Visualization of Energy and Water Consumption and GHG Emissions: A Case Study of a Canadian University Campus. *Energy Build.* 109, 334–352. doi:10.1016/j.enbuild.2015.09.058
- Adalberth, K., 1997. Energy use during the life cycle of single-unit dwellings: Examples. *Build. Environ.* 32, 321–329. doi:10.1016/S0360-1323(96)00069-8
- Agya Utama, N., McLellan, B.C., Gheewala, S.H., Ishihara, K.N., 2012. Embodied impacts of traditional clay versus modern concrete houses in a tropical regime. *Build. Environ.* 57, 362–369. doi:10.1016/j.buildenv.2012.06.006
- Ajayi, S.O., Oyedele, L.O., Ceranic, B., Gallanagh, M., Kadiri, K.O., 2015. Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment. *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.* 6, 14–24. doi:10.1080/2093761X.2015.1006708
- Akbarnezhad, A., Ong, K.C.G., Chandra, L.R., 2014. Economic and environmental assessment of deconstruction strategies using building information modeling. *Autom. Constr.* 37, 131–144. doi:10.1016/j.autcon.2013.10.017
- Akinade, O.O., Oyedele, L.O., Bilal, M., Ajayi, S.O., Owolabi, H.A., Alaka, H.A., Bello, S.A., 2015. Waste minimisation through deconstruction: A BIM based Deconstructability Assessment Score (BIM-DAS). *Resour. Conserv. Recycl.* 105, 167–176. doi:10.1016/j.resconrec.2015.10.018
- Akinade, O.O., Oyedele, L.O., Omotesob, K., Ajayic, S.O., Bilala, M., Owolabid, H.A., Alakae, H.A., Ayrisf, L., Loo-neyg, J.H., 2017. BIM-based deconstruction tool : Towards essential functionalities. *Int. J. Sustain. Built Environ.* doi:10.1016/j.ijsbe.2017.01.002
- Al-Ghamdi, S., Bilec, M., 2017. Green Building Rating Systems and Whole-Building Life Cycle Assessment: Comparative Study of the Existing Assessment Tools. *J. Archit. Eng.* 23, 1–9. doi:10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000222.
- Alwan, Z., Jones, P., Holgate, P., 2017. Strategic sustainable development in the UK construction industry, through the framework for strategic sustainable development, using Building Information Modelling. *J. Clean. Prod.* 140, 349–358. doi:10.1016/j.jclepro.2015.12.085
- Anand, C.K., Amor, B., 2017. Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: A critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* doi:10.1016/j.rser.2016.09.058
- ANP, 2017. Administración Nacional de Puertos [WWW Document]. URL <http://www.anp.com.uy> (accessed 3.1.17).
- Ansi/Ashrae, 2013.
- ANSI/ASHRAE 55:2013 Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Ashrae. doi:10.1007/s11926-011-0203-9
- ANV-MVOTMA, 2017. Agencia Nacional de Vivienda, Ministerio de Vivienda Ordenamiento territorial y Medioambiente [WWW Document]. URL <http://www.anv.gub.uy/> (accessed 1.1.17).
- Asif, M., Muneer, T., Kelley, R., 2007. Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Build. Environ.* 42, 1391–1394. doi:10.1016/j.buildenv.2005.11.023
- Athena Sustainable Materials Institute, 2017. Athena Impact Estimator [WWW Document]. URL <http://www.athenasmi.org/>

## Bibliografía

- Azhar, S., Carlton, W.A., Olsen, D., Ahmad, I., 2011a. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Autom. Constr.* 20, 217–224. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.019
- Azhar, S., Carlton, W.A., Olsen, D., Ahmad, I., 2011b. Building information modeling for sustainable design and LEED® rating analysis. *Autom. Constr.* 20, 217–224. doi:10.1016/j.autcon.2010.09.019
- Azhar, S., Hein, M., Sketo, B., 2007. Building Information Modeling ( BIM ): Benefits , Risks and Challenges. *BIM-benefit Meas.* doi:10.1061/(ASCE)LM.1943-5630.0000127
- Babaizadeh, H., Haghighi, N., Asadi, S., Broun, R., Riley, D., 2015. Life cycle assessment of exterior window shadings in residential buildings in different climate zones. *Build. Environ.* 90, 168–177. doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.038
- Barlish, K., Sullivan, K., 2012. How to measure the benefits of BIM - A case study approach. *Autom. Constr.* 24, 149–159. doi:10.1016/j.autcon.2012.02.008
- Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., Fischer, M., 2013. Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Build. Environ.* 60, 81–92. doi:10.1016/j.buildenv.2012.11.009
- Baumann, H., Tillman, A.-M., 2004. *The Hitch Hiker's Guide to LCA*, Studentlitteratur Lund.
- Belsky, M., Sacks, R., Brilakis, I., 2016. Semantic Enrichment for Building Information Modeling. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 31, 261–274. doi:10.1111/mice.12128
- Bilal, M., Oyedele, L.O., Akinade, O.O., Ajayi, S.O., Alaka, H.A., Owolabi, H.A., Qadir, J., Pasha, M., Bello, S.A., 2016. Big data architecture for construction waste analytics (CWA): A conceptual framework. *J. Build. Eng.* 6, 144–156. doi:10.1016/j.jobe.2016.03.002
- Bilal, M., Oyedele, L.O., Munir, K., Ajayi, S.O., Akinade, O.O., Owolabi, H.A., Alaka, H.A., 2017. The application of web of data technologies in building materials information modelling for construction waste analytics. *Sustain. Mater. Technol.* doi:10.1016/j.susmat.2016.12.004
- Blengini, G.A., 2009. Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy. *Build. Environ.* 44, 319–330. doi:10.1016/j.buildenv.2008.03.007
- Blengini, G.A., Di Carlo, T., 2010. The changing role of life cycle phases, subsystems and materials in the 5LCA6 of low energy buildings. *Energy Build.* 42, 869–880. doi:10.1016/j.enbuild.2009.12.009
- Brander, M., Tipper, R., Hutchison, C., Davis, G., 2008. Consequential and attributional approaches to LCA: a Guide to policy makers with specific reference to greenhouse gas LCA of biofuels. *Econom. Press* 44, 1–14.
- BRE, 2017. BREEAM [WWW Document]. URL <http://www.breeam.com/> (accessed 2.20.17).
- Bryde, D., Broquetas, M., Volm, J.M., 2013. The project benefits of building information modelling (BIM). *Int. J. Proj. Manag.* 31, 971–980. doi:10.1016/j.ijproman.2012.12.001
- Buyle, M., Audenaert, A., Braet, J., Debacker, W., 2015. Towards a more sustainable building stock: Optimizing a flemish dwelling using a life cycle approach. *Buildings* 5. doi:10.3390/buildings5020424
- Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A., 2013. Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 26, 379–388. doi:10.1016/j.rser.2013.05.001

## Bibliografía

- Buyle, M., Braet, J., Audenaert, A., Debacker, W., 2015. Strategies for optimizing the environmental profile of dwellings in a Belgian context: A consequential versus an attributional approach. *J. Clean. Prod.* doi:10.1016/j.jclepro.2016.08.114
- Cabeza, L.F., Rincón, L., Vilarino, V., Pérez, G., Castell, A., 2014. Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 29, 394–416. doi:10.1016/j.rser.2013.08.037
- Casañas, V., 2014. Energy as indicator of environmental impact on building systems, formed from materials Uruguayan domestic production, in: *World Sustainable Built Environment Conference*. Barcelona, pp. 1–8.
- Casañas, V., 2011. La energía como indicador del impacto ambiental de los sistemas constructivos conformados a partir de materiales de producción nacional. Tutor: Miguel Sattler. UFRGS-NORIE-UDELAR.
- Chau, C.K., Leung, T.M., Ng, W.Y., 2015. A review on life cycle assessment, life cycle energy assessment and life cycle carbon emissions assessment on buildings. *Appl. Energy* 143, 395–413. doi:10.1016/j.apenergy.2015.01.023
- Chen, T., Burnett, J., Chau, C., 2001. Analysis of embodied energy use in the residential building of Hong Kong. *Energy* 26, 323–340. doi:10.1016/S0360-5442(01)00006-8
- Cheng, J.C.P., Ma, L.Y.H., 2013. A BIM-based system for demolition and renovation waste estimation and planning. *Waste Manag.* 33, 1539–1551. doi:10.1016/j.wasman.2013.01.001
- Cheung, F.K.T., Rihan, J., Tah, J., Duce, D., Kurul, E., 2012. Early stage multi-level cost estimation for schematic BIM models. *Autom. Constr.* 27, 67–77. doi:10.1016/j.autcon.2012.05.008
- Christiansen, K., (editor), 1997. *Simplifying LCA: just a cut?* SETAC- Society of Environmental Toxicology and Chemistry - Europe, Brussels.
- Citherlet, S., Defaux, T., 2007. Energy and environmental comparison of three variants of a family house during its whole life span. *Build. Environ.* 42, 591–598. doi:10.1016/j.buildenv.2005.09.025
- Classen, M., Althaus, H., Blaser, S., Tuchschruid, M., Jungbluth, N., Doka, G., Emmenegger, M.F., Scharnhorst, W., 2009. *Life Cycle Inventories of Metals*. Final report ecoinvent data v2.1, No 10, Ecoinvent.
- Cockcroft, D., 2016. DesignBuilder building simulation [WWW Document]. [www.designbuilder.co.uk](http://www.designbuilder.co.uk).
- Cole, R.J., 2005. Building environmental assessment methods: redefining intentions and roles. *Build. Res. Inf.* 33, 455–467. doi:10.1080/09613210500219063
- Cole, R.J., 1999. Building Environmental Assessment Methods: Clarifying Intentions. *Build. Res. Inf.* 27, 230–246.
- Cole, R.J., 1998. Emerging trends in building environmental assessment methods. *Build. Res. Inf.* 26, 3–16. doi:10.1080/096132198370065
- CORFO, 2016. Programa Estratégico de Productividad y Sustentabilidad en la Construcción [WWW Document]. URL [www.corfo.cl](http://www.corfo.cl) (accessed 1.1.17).
- Cortazzo, T., 2014. Industria verde. Enlaces 29–44.

## Bibliografía

---

- Crawley, D., Aho, I., 1999. Building environmental assessment methods: Applications and development trends. *Build. Res. Inf.* 27, 300–308.
- CSTB, 2017. ELODIE [WWW Document]. URL <http://editions.cstb.fr/Products/Elodie.html>
- CSTB, MINES ParisTech, Armines, Construction, B., Izuba, Qualité, A.M. de, 2015. BENEFIS [WWW Document]. URL <http://extranet.cstb.fr/sites/anr/benefis/Pages/Accueil.aspx>
- Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic, A., 2014. Life cycle cost analysis of the UK housing stock. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 174–193. doi:10.1007/s11367-013-0610-4
- Cuéllar-Franca, R.M., Azapagic, A., 2012. Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses. *Build. Environ.* 54, 86–99. doi:10.1016/j.buildenv.2012.02.005
- Dahlstrøm, O., Sørnes, K., Eriksen, S.T., Hertwich, E.G., 2012. Life cycle assessment of a single-family residence built to either conventional- or passive house standard. *Energy Build.* 54, 470–479. doi:10.1016/j.enbuild.2012.07.029
- de Lasso, J., França, J., Espirito Santo, K., Haddad, A., 2016. Case Study: LCA Methodology Applied to Materials Management in a Brazilian Residential Construction Site. *J. Eng.* 2016, 1–9. doi:10.1155/2016/8513293
- Densley Tingley, D., Hathway, A., Davison, B., 2015. An environmental impact comparison of external wall insulation types. *Build. Environ.* 85, 182–189. doi:10.1016/j.buildenv.2014.11.021
- Dewulf, J., Van Der Vorst, G., Versele, N., Janssens, A., Van Henderson, J., 2004. Comparison of running costs for different heating options in hard to treat flats. *UK Energy Sav. Trust Build. Res. Establ.*
- DINAMA, 2015. Indicadores ambientales [WWW Document]. URL [https://www.dinama.gub.uy/indicadores\\_ambientales/fichas/](https://www.dinama.gub.uy/indicadores_ambientales/fichas/)
- Ding, G.K.C., 2008. Sustainable construction-The role of environmental assessment tools. *J. Environ. Manage.* 86, 451–464. doi:10.1016/j.jenvman.2006.12.025
- Ding, G.K.C., 2004. The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities. University of Technology, Sydney.
- DNE-MIEM, 2015. Balance energético 2015. Montevideo.
- Eadie, R., Browne, M., Odeyinka, H., McKeown, C., McNiff, S., 2013. BIM implementation throughout the UK construction project lifecycle: An analysis. *Autom. Constr.* 36, 145–151. doi:10.1016/j.autcon.2013.09.001
- Ecoinvent Centre, 2007. Ecoinvent data V2.0. Swiss Cent. Life Cycle Invent.
- EeB Guide Project, 2012. Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy Efficient Buildings Initiative [WWW Document]. URL <http://www.eebguide.eu/>
- Ekvall, T., Azapagic, A., Finnveden, G., Rydberg, T., Weidema, B.P., Zamagni, A., 2016. Attributional and consequential LCA in the ILCD handbook. *Int. J. Life Cycle Assess.* 21, 293–296. doi:10.1007/s11367-015-1026-0

## Bibliografía

Eleftheriadis, S., Mumovic, D., Greening, P., 2017. Life cycle energy efficiency in building structures: A review of current developments and future outlooks based on BIM capabilities. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67, 811–825. doi:10.1016/j.rser.2016.09.028

Elmualim, A., Gilder, J., 2014. BIM: innovation in design management, influence and challenges of implementation. *Archit. Eng. Des. Manag.* 10, 183–199. doi:10.1080/17452007.2013.821399

Emmanuel, R., 2004. Estimating the environmental suitability of wall materials: Preliminary results from Sri Lanka. *Build. Environ.* 39, 1253–1261. doi:10.1016/j.buildenv.2004.02.012

EN, 2015. EN 16627:2015 - Sustainability of construction works - Assessment of economic performance of buildings - Calculation methods. *Int. Stand.* doi:10.1520/E0872-82R13.2

EN, 2012d. EN 15804:2012 + A1:2013 - Sustainability of construction works — Environmental product declarations — Core rules for the product category of construction products. *Int. Stand.* 70.

EN, 2012b. EN 15643-2:2011 - Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 2 : Framework for the assessment of environmental performance. *Int. Stand.* 1–36.

EN, 2012c. EN 15643-4:2012 - Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 4 : Framework for the assessment of economic performance. *Int. Stand.* 1–36. doi:EN 15643-4

EN, 2012a. EN 15643-3:2012 - Sustainability of construction works - Assessment of buildings - Part 3 : Framework for the assessment of social performance. *Int. Stand.* 1–36.

EN, 2011. EN 15978:2011 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. *Int. Stand.*

EN, 2010. EN 15643-1:2010 - Sustainability of construction works - Sustainability assessment of buildings - Part 1 : General framework. *Int. Stand.* 1–25.

ENSLIC, 2010. ENSLIC [WWW Document]. URL <http://circe.cps.unizar.es/enslic/texto/home.html>

European Commission, 2008. Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council on waste and repealing certain Directives.

European Commission, n.d. HORIZONTE 2020 [WWW Document]. URL <http://www.eshorizonte2020.es/>

European Commission, n.d. IMPRO-Building [WWW Document]. URL <http://ftp.jrc.es/EURdoc/JRC46667.pdf>

European Commission, n.d. PRESCO Project [WWW Document]. URL [http://relay.iclei-europe.org/fileadmin/user\\_upload/relay/uploads/Kornadt.pdf](http://relay.iclei-europe.org/fileadmin/user_upload/relay/uploads/Kornadt.pdf)

Fichtner, LKSUR Asociados, 2004. Plan Director de Residuos Sólidos de Montevideo y Área Metropolitana TOMO VI: Residuos de Obras Civiles.

Forsberg, A., 2004. Tools for environmental assessment of the built environment. *Build. Environ.* 39, 223–228. doi:10.1016/j.buildenv.2003.09.004

## Bibliografía

---

- Fouquet, M., Levasseur, A., Margni, M., Lebert, A., Lasvaux, S., Souyri, B., Buhé, C., Woloszyn, M., 2015. Methodological challenges and developments in LCA of low energy buildings: Application to biogenic carbon and global warming assessment. *Build. Environ.* 90, 51–59. doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.022
- Frischknecht, R., Jungbluth, N., Althaus, H.J., Doka, G., Dones, R., R., H., Hellweg, S., Humbert, S., Margni, M., Nemecek, T., Spielmann, M., 2007. Implementation of life cycle impact assessment methods: data v2.0.
- Galan-Marín, C., Rivera-Gómez, C., García-Martínez, A., 2016. Use of Natural-Fiber Bio-Composites in Construction versus Traditional Solutions: Operational and Embodied Energy Assessment. *Materials (Basel)*. 9, 465. doi:10.3390/ma9060465
- Gantner, J., Schneider, S., Fischer, M., Lozanovski, A., Gehring, F., 2014. BIM as a data source for LCA and building certification schemes Certification schemes and BIM as a possible solution German research project BIMiD, in: New Zealand Life Cycle Assessment Conference. pp. 116–119.
- García-Martínez, A., 2010. Life Cycle Assessment (LCA) for the development of Environmental Declarations of Dwellings in Andalusia. Universidad de Sevilla.
- García-Martínez, A., Carmen, L., Navarro Casas, J., 2011. Life Cycle Assessment of Three Dwellings in Andalusia (Spain), in: International Workshop on Environment, New Energy Techniques and Applications. Yichang, China., p. 1. 4.
- Georges, L., Haase, M., Houlihan Wiberg, A., Kristjansdottir, T., Risholt, B., 2014. Life cycle emissions analysis of two nZEB concepts. *Build. Res. Inf.* 43, 82–93. doi:10.1080/09613218.2015.955755
- Gervasio, H., Santos, P., Martins, R., Simoes da Silva, L., 2014. A macro-component approach for the assessment of building sustainability in early stages of design. *Build. Environ.* 73, 256–270. doi:10.1016/j.buildenv.2013.12.015
- Ghaffarianhoseini, A., Tookey, J., Ghaffarianhoseini, A., Naismith, N., Azhar, S., Efimova, O., Raahemifar, K., 2016. Building Information Modelling (BIM) uptake: Clear benefits, understanding its implementation, risks and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* doi:10.1016/j.rser.2016.11.083
- Giesekam, J., Barrett, J., Taylor, P., Owen, A., 2014. The greenhouse gas emissions and mitigation options for materials used in UK construction. *Energy Build.* 78, 202–214. doi:10.1016/j.enbuild.2014.04.035
- Glaumann, M., Malmqvist, T., Peuportier, B., Wetzel, C., Scarpellini, S., Zabalza, I., Díaz De Garayo, S., Staller, H., Krigsvoll, G., Stoykova, E., Horváth, S., Szalay, Z., Degiovanni, V., 2010. Directrices para el ACV simplificado de edificios.
- Gómez de Cózar, J.C., García-Martínez, A., Ariza Lopez, I.A., Ruiz Alfonsea, M., 2017. Lightweight and quickly assembled: the most Eco-efficient model for architecture. *Int. J. Comput. Methods Exp. Meas.* 5, 539–550.
- Gómez Pérez, M., 2014. Análisis medioambiental de sistemas constructivos y edificatorios. Desarrollo instrumental a partir de herramientas tipo BIM. Tutores: Juan Carlos Gómez de Cózar y Antonio García Martínez. MIATD, Universidad de Sevilla.
- Grann, B., 2012. A Building Information Model ( BIM ) Based Lifecycle Assessment of a University Hospital Building Built to Passive House Standards.
- GRAPHISOFT, 2017. Archicad 19 [WWW Document]. URL <http://www.graphisoft.es/> (accessed 1.1.17).



## Bibliografía

- Grilo, A., Jardim-Goncalves, R., 2010. Value proposition on interoperability of BIM and collaborative working environments. *Autom. Constr.* 19, 522–530. doi:10.1016/j.autcon.2009.11.003
- Gustavsson, L., Joelsson, A., 2010. Life cycle primary energy analysis of residential buildings. *Energy Build.* 42, 210–220. doi:10.1016/j.enbuild.2009.08.017
- Haapio, A., Viitaniemi, P., 2008. A critical review of building environmental assessment tools. *Environ. Impact Assess. Rev.* 28, 469–482. doi:10.1016/j.eiar.2008.01.002
- Häfliger, I.-F., John, V., Passer, A., Lasvaux, S., Hoxha, E., Saade, M.R.M., Habert, G., 2017. Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials. *J. Clean. Prod.* 156, 805–816. doi:10.1016/j.jclepro.2017.04.052
- Häkkinen, T., Kiviniemi, A., 2008. Sustainable Building and BIM, in: *World Conference SB08*. pp. 679–686.
- Hamidi, B., Bulbul, T., 2012. A Comparative Analysis of Sustainable Approaches to Building End-of-Lifecycle: Underlying Deconstruction Principles in Theory and Practice, in: *ICSDEC 2012*. American Society of Civil Engineers, Reston, VA, pp. 155–162. doi:10.1061/9780784412688.018
- Hammond, G., Jones, C., 2011. *Embodied Carbon The Inventory of Carbon and Energy*.
- Hanandeh, A. El, 2015. Environmental assessment of popular single-family house construction alternatives in Jordan. *Build. Environ.* 92, 192–199. doi:10.1016/j.buildenv.2015.04.032
- Harrison, R., 1990. *Pollution: causes, effects and control*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.
- Hauschild, M., Jeswiet, J., Alting, L., 2005. From Life Cycle Assessment to sustainable production: Status and perspectives. *Cirp Ann. Technol.* 54, 535–554. doi:10.1016/S0007-8506(07)60017-1
- Hauschild, M.Z., 2005. Assessing environmental impacts in a life-cycle perspective. *Environ. Sci. Technol.* 39, 81A–88A. doi:10.1021/es053190s
- Hernandez-Sánchez, J., 2013. *Metodología basada en ACV para la evaluación de sostenibilidad en edificios*.
- Hiyama, K., Kato, S., Kubota, M., Zhang, J., 2014. A new method for reusing building information models of past projects to optimize the default configuration for performance simulations. *Energy Build.* 73, 83–91. doi:10.1016/j.enbuild.2014.01.025
- Horvat, M., Fazio, P., 2005. Comparative Review of Existing Certification Programs and Performance Assessment Tools for Residential Buildings. *Archit. Sci. Rev.* 48, 69–80. doi:10.3763/asre.2005.4810
- Houlihan Wiberg, A., Georges, L., Dokka, T.H., Haase, M., Time, B., Lien, A.G., Mellegård, S., Maltha, M., 2014. A net zero emission concept analysis of a single-family house. *Energy Build.* 74, 101–110. doi:10.1016/j.enbuild.2014.01.037
- Howard, R., Björk, B.C., 2008. Building information modelling - Experts' views on standardisation and industry deployment. *Adv. Eng. Informatics* 22, 271–280. doi:10.1016/j.aei.2007.03.001

## Bibliografía

---

Hoxha, E., Habert, G., Lasvaux, S., Chevalier, J., Le Roy, R., 2017. Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability. *J. Clean. Prod.* 144, 33–47. doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.068

Iddon, C.R., Firth, S.K., 2013. Embodied and operational energy for new-build housing: A case study of construction methods in the UK. *Energy Build.* 67, 479–488. doi:10.1016/j.enbuild.2013.08.041

IEA EBC, 2016. ANNEX 57 [WWW Document]. URL <http://www.annex57.org/> (accessed 2.1.17).

IEA EBC, 2005. ANNEX 31 [WWW Document]. URL <http://www.iisbe.org/annex31/index.html> (accessed 1.1.17).

Ilhan, B., Yaman, H., 2016. Green building assessment tool (GBAT) for integrated BIM-based design decisions. *Autom. Constr.* 70, 26–37. doi:10.1016/j.autcon.2016.05.001

IM, 2011. SuAmVi [WWW Document]. URL [http://mvd2030.montevideo.gub.uy/sites/mvd2030.montevideo.gub.uy/files/biblioteca/presentacion\\_suamvi\\_0.pdf](http://mvd2030.montevideo.gub.uy/sites/mvd2030.montevideo.gub.uy/files/biblioteca/presentacion_suamvi_0.pdf) (accessed 2.1.17).

IM, 2009. Normas para edificios destinados a vivienda.

INE, 2017. Instituto Nacional de Estadística [WWW Document]. URL <http://www.ine.gub.uy/> (accessed 1.1.17).

Ini, L., 2016. La eólica ya alcanza a cubrir el 50% de la demanda eléctrica [WWW Document]. *Renew. Energy Mag.* URL <http://www.renewableenergymagazine.com/article/la-eolica-ya-alcanza-a-cubrir-el-20160516> (accessed 1.1.17).

Inyim, P., Rivera, J., Zhu, Y., 2014. Integration of Building Information Modeling and Economic and Environmental Impact Analysis to Support Sustainable Building Design. *J. Manag. Eng.* A4014002, 2–10. doi:10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000308

IPCC, 2014. Cambio Climático 2014. Informe de síntesis.

IPCC, 2007. Cambio Climático 2007. Informe síntesis.

Isasi, X.O., Tenorio, J., Gazulla, C., Zabalza, I., Cambra, D., Leao, S., Mabe, L., Otero, S., Raigosa, J., 2016.

SOFIAS – Software for life-cycle assessment and environmental rating of buildings. *Inf. la Construcción* 68. doi:10.3989/ic.15.055

Islam, H., Jollands, M., Setunge, S., Ahmed, I., Haque, N., 2014. Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Implications of Wall Assemblages Designs. *Energy Build.* 84, 33–45. doi:10.1016/j.enbuild.2014.07.041

ISO, 2014a. ISO 15686-4:2014 - Building Construction - Service Life Planning - Part 4: Service Life Planning using Building Information Modelling. BSI Stand. 34.

ISO, 2014b. ISO 16309 - BSI Standards Publication Sustainability of construction works - Assessment of social performance of buildings - Calculation methodology. Int. Stand.

ISO, 2012b. ISO 15686-3:2002 - Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 3: Performance audits and reviews. Int. Stand. 3, 36. doi:10.5594/J09750

## Bibliografía

- ISO, 2012a. ISO 15686-6:2004 - Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 6: Procedures for considering environmental impacts. Int. Stand. 3, 36.
- ISO, 2012c. ISO 15686-7 - Service life planning Part 7: Performance evaluation for feedback of service life data from practice. Int. Stand. 3, 36.
- ISO, 2011b. ISO 15686-1:2011 - Buildings and constructed assets — Service life planning Part 1 : General principles and framework. Int. Stand. 34.
- ISO, 2011a. ISO 15686-2:2012 - Buildings and constructed assets — Service life planning — Part 2: Service life prediction procedures. Int. Stand.
- ISO, 2008c. ISO 13790: 2008 Energy performance of buildings-Calculation of energy use for space heating and cooling. Order A J. Theory Ordered Sets Its Appl. 2008, 3190–200. doi:10.3168/jds.2007-0930
- ISO, 2008b. ISO 15686-5:2008 - Buildings and constructed assets -- Service-life planning -- Part 5: Life-cycle costing. Int. Stand.
- ISO, 2008a. ISO 15686-8 - Service-life planning - Part 8: Reference service life and service-life estimation. Int. Stand.
- ISO, 2006a. ISO 14040:2006 Environmental management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework.
- ISO, 2006b. ISO 14044:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, ISO.
- IZUBA énergies, 2017. EQUER [WWW Document]. URL <http://www.izuba.fr/>
- Jaillon, L., Poon, C.S., 2014. Life cycle design and prefabrication in buildings: A review and case studies in Hong Kong. Autom. Constr. 39, 195–202. doi:10.1016/j.autcon.2013.09.006
- Jalaei, F., Jrade, A., 2015. Integrating building information modeling (BIM) and LEED system at the conceptual design stage of sustainable buildings. Sustain. Cities Soc. 18, 95–107. doi:10.1016/j.scs.2015.06.007
- Jalaei, F., Jrade, A., 2014. An Automated BIM Model to Conceptually Design , Analyze , Simulate , and Assess Sustainable Building Projects. Hindawi 2014, 1–21. doi:10.1155/2014/672896
- John, V., 2012. Derivation Of Reliable Simplification Strategies For The Comparative Lca Of Individual And “Typical” Newly Built Swiss Apartment Buildings. ETH ZURICH. doi:dx.doi.org/10.3929/ethz-a-007607252
- Jrade, A., Abdulla, R., 2012. Integrating Building Information Modeling and Life Cycle Assessment Tools to Design Sustainable Buildings, in: Proceedings of the 29th International Conference of CIB W78. Beirut, pp. 173–182.
- Jrade, A., Jalaei, F., 2013. Integrating building information modelling with sustainability to design building projects at the conceptual stage. Build. Simul. 6, 429–444. doi:10.1007/s12273-013-0120-0
- Jun, H., Kim, I., Lee, Y., Kim, M., 2015. A study on the bim application of green building certification system. J. Asian Archit. Build. Eng. 14, 9–16.
- Kang, H.J., 2015. Development of a systematic model for an assessment tool for sustainable buildings based on a structural framework. Energy Build. 104, 287–301. doi:10.1016/j.enbuild.2015.07.015

## Bibliografía

- Karami, P., Al-Ayish, N., Gudmundsson, K., 2015. A comparative study of the environmental impact of Swedish residential buildings with vacuum insulation panels. *Energy Build.* 109, 183–194. doi:10.1016/j.enbuild.2015.10.031
- Kellenberger, D., Althaus, H.J., 2009. Relevance of simplifications in LCA of building components. *Build. Environ.* 44, 818–825. doi:10.1016/j.buildenv.2008.06.002
- Kellenberger, D., Althaus, H.J.H.-J., Jungbluth, N., Künniger, T., Lehmann, M., Thalmann, P., 2004. Life Cycle Inventories of Building Products. Final report ecoinvent 2000 No. 7. Dübendorf, CH.
- Khosrowshahi, F., Ghodous, P., Sarshar, M., 2014. Visualization of the Modeled Degradation of Building Flooring Systems in Building Maintenance. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 29, 18–30. doi:10.1111/mice.12029
- Kofoworola, O.F., Gheewala, S.H., 2009. Life cycle energy assessment of a typical office building in Thailand. *Energy Build.* 41, 1076–1083. doi:10.1016/j.enbuild.2009.06.002
- Kolokotroni, M., Robinson-Gayle, S., Tanno, S., Cripps, A., 2004. Environmental impact analysis for typical office facades. *Build. Res. Inf.* 32, 2–16. doi:10.1080/0961321031000108807
- Koroneos, C., Kottas, G., 2007. Energy consumption modeling analysis and environmental impact assessment of model house in Thessaloniki-Greece. *Build. Environ.* 42, 122–138. doi:10.1016/j.buildenv.2005.08.009
- Kota, S., Haberl, J.S., Clayton, M.J., Yan, W., 2014. Building Information Modeling (BIM)-based daylighting simulation and analysis. *Energy Build.* 81, 391–403. doi:10.1016/j.enbuild.2014.06.043
- Kreiner, H., Passer, A., Wallbaum, H., 2015. A new systemic approach to improve the sustainability performance of office buildings in the early design stage. *Energy Build.* 109, 385–396. doi:10.1016/j.enbuild.2015.09.040
- Kriegel, E., Nies, B., 2008. *Green BIM: Successful Sustainable Design with Building Information Modeling*. Wiley Publishing, Indianapolis, USA.
- KT Innovations, Autodesk, 2014. Tally-Autodesk [WWW Document]. URL <http://choosetally.com/>
- KTH and all partners contributions, 2010. ENSLIC Project. Guidelines for LCA calculations [WWW Document]. URL <https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/enslic-building>
- Kulahcioglu, T., Dang, J., Toklu, C., 2012. A 3D analyzer for BIM-enabled Life Cycle Assessment of the whole process of construction A 3D analyzer for BIM-enabled Life Cycle Assessment of the whole process of construction. *HVA-C&R Res.* 18:1-2, 37–41. doi:10.1080/10789669.2012.634264
- Kungl. Tekniska högskolan., International Council for Research and Innovation in Building and Construction., Statens råd för byggnadsforskning (Sweden), 1996. *Electronic journal of information technology in construction*. Royal Institute of Technology.
- Kylili, A., Fokaides, P.A., Vaiciunas, J., Seduikyte, L., 2015. Integration of Building Information Modelling (BIM) and Life Cycle Assessment (LCA) for sustainable constructions. *J. Sustain. Archit. Civ. Eng.* 4, 28–38. doi:http://dx.doi.org/10.5755/j01.sace.13.4.12862
- Lamnatou, C., Chemisana, D., Mateus, R., Almeida, M.G., Silva, S.M., 2015. Review and perspectives on Life Cycle Analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems. *Renew. Energy* 75, 833–846. doi:10.1016/j.renene.2014.09.057

## Bibliografía

Lasvaux, S., 2010. Etude d'un modele simplifie pour l'analyse de cycle de vie des batiments. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

Lasvaux, S., Gantner, J., Schiopu, N., Nibel, S., Bazzana, M., Bosdevigie, B., Sibiude, G., 2013. Towards a new generation of building LCA tools adapted to the building design process and to the user needs?, in: SB13. Graz. pp. 1–12.

Lasvaux, S., Habert, G., Peuportier, B., Chevalier, J., 2015. Comparison of generic and product-specific Life Cycle Assessment databases: application to construction materials used in building LCA studies. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 1473–1490. doi:10.1007/s11367-015-0938-z

Lasvaux, S., Lebert, A., Achim, F., Grannec, F., Hoxha, E., Nibel, S., Schiopu, N., Chevalier, J., 2017. Towards guidance values for the environmental performance of buildings: application to the statistical analysis of 40 low-energy single family houses' LCA in France. *Int. J. Life Cycle Assess.* 1–18. doi:10.1007/s11367-016-1253-z

Lasvaux, S., Schiopu, N., Chevalier, J., Peuportier, B., 2012. Relevance of a French simplified life cycle inventory database using building products industry data, in: International Symposium of Life Cycle Assessment and Construction. Nantes, France, pp. 46–54.

Lasvaux, S., Schiopu, N., Habert, G., Chevalier, J., Peuportier, B., 2014. Influence of simplification of life cycle inventories on the accuracy of impact assessment: application to construction products. *J. Clean. Prod.* 79, 142–151. doi:10.1016/j.jclepro.2014.06.003

Lasvaux, S., Ventura, A., Habert, G., De La Roche, C., Hermel, K., Feraille, A., Tardivel, Y., Tessier, C., 2014. Linking research activities and their implementation in practice in the construction sector: the LCA Construction 2012 experience. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 463–470. doi:10.1007/s11367-013-0682-1

Lasvaux, S.S., Gantner, J., Wittstock, B., Bazzana, M., Schiopu, N., Saunders, T., Gazulla, C., Mundy, J.A., Sjöström, C., Fullana-i-Palmer, P., Barrow-Williams, T., Braune, A., Anderson, J., Lenz, K., Takacs, Z., Hans, J., Chevalier, J., Sjöström, C., Fullana-i-Palmer, P., Barrow-Williams, T., Braune, A., Anderson, J., Lenz, K., Takacs, Z., Hans, J., Chevalier, J., 2014. Achieving consistency in life cycle assessment practice within the European construction sector: the role of the EeBGuide InfoHub. *Int. J. Life Cycle Assess.* 19, 1783–1793. doi:10.1007/s11367-014-0786-2

Lawrence, T.M., Watson, R.T., Boudreau, M.-C., Johnsen, K., Perry, J., Ding, L., 2012. A new paradigm for the design and management of building systems. *Energy Build.* 51, 56–63. doi:10.1016/j.enbuild.2012.04.016

Lee, S., Tae, S., Roh, S., Kim, T., 2015. Green Template for Life Cycle Assessment of Buildings Based on Building Information Modeling: Focus on Embodied Environmental Impact. *Sustainability* 7, 16498–16512. doi:doi:10.3390/su71215830

Lewandowska, A., Noskowiak, A., Pajchrowski, G., 2013. Comparative life cycle assessment of passive and traditional residential buildings' use with a special focus on energy-related aspects. *Energy Build.* 67, 635–646. doi:10.1016/j.enbuild.2013.09.002

Lewandowska, A., Noskowiak, A., Pajchrowski, G., Zarebska, J., 2015. Between full LCA and energy certification methodology??a comparison of six methodological variants of buildings environmental assessment. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 9–22. doi:10.1007/s11367-014-0805-3

Li, B., Fu, F.F., Zhong, H., Luo, H.B., 2012. Research on the computational model for carbon emissions in building construction stage based on BIM. *Struct. Surv.* 30, 411–425. doi:10.1108/02630801211288198

## Bibliografía

---

- Li, X., Su, S., Shi, J., Zhang, Z., 2015. An environmental impact assessment framework and index system for the pre-use phase of buildings based on distance-to-target approach. *Build. Environ.* 85, 173–181. doi:10.1016/j.buildenv.2014.11.035
- Lin, J.-R., Hu, Z.-Z., Zhang, J.-P., Yu, F.-Q., 2016. A Natural-Language-Based Approach to Intelligent Data Retrieval and Representation for Cloud BIM. *Comput. Civ. Infrastruct. Eng.* 31, 18–33. doi:10.1111/mice.12151
- Liu, S., Meng, X., Tam, C., 2015. Building information modeling based building design optimization for sustainability. *Energy Build.* 105, 139–153. doi:10.1016/j.enbuild.2015.06.037
- Llatas, C., García-Martínez, A., Roveri, A., Huete, R., 2010. Una Aproximación a la Evaluación de la Eco-Eficiencia en Edificios. Herramientas Básicas. Ponencias del Congreso, in: Sb10mad. Edificación Sostenible, Revitalización Y Rehabilitación de Barrios.
- Llatas, C., Osmani, M., 2016. Development and validation of a building design waste reduction model. *Waste Manag.* 56, 318–336. doi:10.1016/j.wasman.2016.05.026
- Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufrasnes, E., Sonnemann, G., 2015. Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Build. Environ.* 93, 165–178. doi:10.1016/j.buildenv.2015.06.029
- Luo, Y., Wu, W., 2015. Sustainable Design with BIM Facilitation in Project-based Learning, in: *Procedia Engineering*, pp. 819–826. doi:10.1016/j.proeng.2015.08.519
- Mah, D., Manrique, J.D., Yu, H., Al-Hussein, M., Nasser, R., 2011. House construction CO2 footprint quantification: a BIM approach. *Constr. Innov. Information, Process. Manag.* 11, 161–178. doi:10.1108/1471417111124149
- Mahdavi, A., Doppelbauer, E.M., 2010. A performance comparison of passive and low-energy buildings. *Energy Build.* 42, 1314–1319. doi:10.1016/j.enbuild.2010.02.025
- Malmqvist, T., Glaumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranda, A., Llera, E., Díaz, S., 2011. Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy* 36, 1900–1907. doi:10.1016/j.energy.2010.03.026
- Martínez-Rocamora, A., Solís-Guzmán, J., Marrero, M., 2016. LCA databases focused on construction materials: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* doi:10.1016/j.rser.2015.12.243
- Mateus, R., Bragança, L., 2011. Sustainability assessment and rating of buildings: Developing the methodology SB-ToolPT-H. *Build. Environ.* 46, 1962–1971. doi:10.1016/j.buildenv.2011.04.023
- Mateus, R., Bragança, L., Koukari, H., 2008. Sustainability Assessment and Rating of Portuguese Buildings, in: SB08. pp. 1–8.
- Memari, A.M., Huelman, P.H., Iulo, L.D., Laquatra, J., Martin, C., McCoy, A., Nahmens, I., Williamson, T., 2014. Residential Building Construction: State-of-the-Art Review. *J. Archit. Eng.* 20, 1–38. doi:10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000157.
- Mesa González, A., 2013. Análisis de ciclo de vida de soluciones arquitectónicas ligeras de rápido montaje: el sistema florín. Tutores: Juan Carlos Gómez de Cózar y Antonio García Martínez. MIATD, Universidad de Sevilla.



## Bibliografía

- MIEM, 2015. Plan Nacional de Eficiencia Energética 2015 - 2024. Montevideo.
- Microsoft, 2016. Microsoft Office Excel. [WWW Document]. URL <http://www.microsoft.com/> (accessed 2.1.17).
- Mimbacas, A., 2012. Caracterizacao do consumo doméstico de materiais da cidades de Montevideu mediante Análise de Fluxos de Materiais.
- Minister of Construction, 2002. The regulation of the Minister of Construction as of 14 January 2002 relating to determination of mean water consumption standards. J. Laws 8.
- Mithraratne, N., Vale, B., 2004. Life cycle analysis model for New Zealand houses. Build. Environ. 39, 483–492. doi:10.1016/j.buildenv.2003.09.008
- Monahan, J., Powell, J.C., 2011. An embodied carbon and energy analysis of modern methods of construction in housing: A case study using a lifecycle assessment framework. Energy Build. 43, 179–188. doi:10.1016/j.enbuild.2010.09.005
- Moncaster, A.M., Symons, K.E., 2013. A method and tool for “cradle to grave” embodied carbon and energy impacts of UK buildings in compliance with the new TC350 standards. Energy Build. 66, 514–523. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.046
- Monteiro, H., Freire, F., 2012. Life-cycle assessment of a house with alternative exterior walls: Comparison of three impact assessment methods. Energy Build. 47, 572–583. doi:10.1016/j.enbuild.2011.12.032
- Mosteiro-Romero, M., Krogmann, U., Wallbaum, H., Ostermeyer, Y., Senick, J.S., Andrews, C.J., 2014. Relative importance of electricity sources and construction practices in residential buildings: A Swiss-US comparison of energy related life-cycle impacts. Energy Build. 68, 620–631. doi:10.1016/j.enbuild.2013.09.046
- Motuziene, V., Rogoža, A., Lapinskiene, V., Vilutiene, T., Motuziene, V., Rogoža, A., Lapinskiene, V., Vilutiene, T., 2016. Construction solutions for energy efficient single-family house based on its life cycle multi-criteria analysis: a case study. J. Clean. Prod. 112, 532–541. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.103
- MVOTMA, 2014. Reglamento de promoción de la vivienda de interés social.
- MVOTMA, 2013. Informe del estado del ambiente. Indicadores ambientales de Uruguay.
- MVOTMA, 2011a. Bases del sistema de otorgamiento de aptitud técnica a sistemas constructivos no tradicionales.
- MVOTMA, 2011b. Estándares de desempeño para vivienda de interés social.
- MVOTMA, SNRCC, 2015. Primer informe bienal de actualización de Uruguay a la convención marco de la Naciones Unidas sobre el cambio climático. Montevideo.
- Nasa, 2017. Nasa Earth Observatory. Antarctic Ozone Hole [WWW Document]. URL <http://earthobservatory.nasa.gov/Features/WorldOfChange/ozone.php> (accessed 2.1.17).
- Navarro Osta, A., 2014. Arquitectura ligera y de rápido montaje: búsqueda de modelos. El Análisis de Ciclo de Vida como herramienta de evaluación y corrección de modelos. Tutores: Juan Carlos Gómez de Cózar y Antonio García Martínez. MIATD, Universidad de Sevilla.

## Bibliografía

---

Nemry, F., Uihlein, A., Colodel, C.M., Wittstock, B., Braune, A., Wetzel, C., Hasan, I., Niemeier, S., Frech, Y., 2008. Environmental Improvement Potentials of Residential Buildings (IMPRO-Building), IPTS-JRC, European Commission. doi:10.2791/38942

Nguyen, T.H., Ph, D., Toroghi, S.H., Asce, S.M., Jacobs, F., Ph, D., 2012. Automated Green Building Rating System for Building Designs. *J. Arch. Eng.* 1–10. doi:10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000168.

Oneclick LCA, 2017. [WWW Document]. URL <http://http://www.oneclicklca.com/green-building-software/> (accessed 2.1.17).

O'Sullivan, D.T.J., Keane, M.M., Kelliher, D., Hitchcock, R.J., 2004. Improving building operation by tracking performance metrics throughout the building lifecycle (BLC). *Energy Build.* 36, 1075–1090. doi:10.1016/j.enbuild.2004.03.003

Olsson, S., Malmqvist, T., Glaumann, M., 2016. An approach towards sustainable renovation-A tool for decision support in early project stages. *Build. Environ.* 106, 20–32. doi:10.1016/j.buildenv.2016.06.016

Ortiz, O., Bonnet, C., Bruno, J.C., Castells, F., 2009a. Sustainability based on LCM of residential dwellings: A case study in Catalonia, Spain. *Build. Environ.* 44, 584–594. doi:10.1016/j.buildenv.2008.05.004

Ortiz, O., Castells, F., Sonnemann, G., 2009b. Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA. *Constr. Build. Mater.* doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.11.012

Oyarzo, J., Peuportier, B., 2014. Life cycle assessment model applied to housing in Chile. *J. Clean. Prod.* 69, 109–116. doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.090

Oyedele, L.O., 2013. Analysis of architects' demotivating factors in design firms. *Int. J. Proj. Manag.* 31, 342–354. doi:10.1016/j.ijproman.2012.11.009

Oyedele, L.O., Tham, K.W., 2007. Clients' assessment of architects' performance in building delivery process: Evidence from Nigeria. *Build. Environ.* 42, 2090–2099. doi:10.1016/j.buildenv.2005.06.030

Passer, A., Kreiner, H., Maydl, P., 2012. Assessment of the environmental performance of buildings: A critical evaluation of the influence of technical building equipment on residential buildings. *Int. J. Life Cycle Assess.* 17, 1116–1130. doi:10.1007/s11367-012-0435-6

Passer, A., Ouellet-Plamondon, C., Kenneally, P., John, V., Habert, G., 2016. The impact of future scenarios on building refurbishment strategies towards plus energy buildings. *Energy Build.* 124, 153–163. doi:10.1016/j.enbuild.2016.04.008

Passer, A., Wall, J., Kreiner, H., Maydl, P., Höfler, K., 2014. Sustainable buildings, construction products and technologies: linking research and construction practice. *Int. J. Life Cycle Assess.* 1–8. doi:10.1007/s11367-014-0820-4

Peluso, P., 2011. Análisis de la energía incorporada de un edificio en altura en Uruguay. Tutor: Miguel Sattler. UFRGS-NORIE-UDELAR.

Peng, C., 2014. Calculation of a building's life cycle carbon emissions based on Ecotect and building information modeling. *J. Clean. Prod.* 112, 453–465. doi:10.1016/j.jclepro.2015.08.078

## Bibliografía

- Peng, C., Xiao, W., 2015. Case Study of Carbon Emissions from a Building's Life Cycle Based on BIM and Ecotect. Hindawi 15. doi:dx.doi.org/10.1155/2015/954651
- Petersdorff, C., Boermans, T., Harnisch, J., 2006. Mitigation of CO<sub>2</sub> emissions from the EU-15 building stock: beyond the EU Directive on the Energy Performance of Buildings. *Environ. Sci. Pollut. Res. Int.* 13, 350–358. doi:10.1007/BF03039568
- Peuportier, B., Leurent, F., Roger-Estrade, J., 2016. *Eco-design of Buildings and Infrastructure*. London.
- Peuportier, B., Thiers, S., Guiavarch, A., 2013. Eco-design of buildings using thermal simulation and life cycle assessment. *J. Clean. Prod.* 39, 73–78. doi:10.1016/j.jclepro.2012.08.041
- Picción, A., Camacho, M., López Salgado, M. N., Milicua, S., 2009. Pautas de diseño bioclimático para optimizar condiciones de confort y uso de energía en el sector residencial financiado por organismos públicos, para Uruguay, caso de clima complejo. Informe final.
- Picción, A., Milicua, S., Camacho, M., 2014a. Trabajo presentado en las XIII Jornadas de Investigación de la Facultad de Ciencias Sociales, UdelAR, Montevideo, 15-17 de setiembre de 2014 15–17.
- Picción, A., Milicia, S., Camacho, M., 2014b. Consumo de energía residencial y confort. Aportes para identificar patrones de consumo energético, in: XIII Jornadas de Investigación de La Facultad de Ciencias Sociales. pp. 1–8.
- Pierucci, A., Dell'Osso, G., Cavalliere, C., 2015. Building information flow management through LCA evaluations, in: *ISTeA 2015, At Milano, Volume: Environmental Sustainability, Circular Economy and Building Production*.
- Poder Legislativo, República Oriental del Uruguay, 2009. Ley No 18.597 de Uso Eficiente de la Energía. Montevideo.
- Porwal, A., Hewage, K.N., 2013. Building Information Modeling (BIM) partnering framework for public construction projects. *Autom. Constr.* 31, 204–214. doi:10.1016/j.autcon.2012.12.004
- Pratchett, L., 1999. New Technologies and the Modernization of Local Government: an Analysis of Biases and Constraints. *Public Adm.* 77, 731–751. doi:10.1111/1467-9299.00177
- PRé Sustainability, 2017. SimaPro [WWW Document]. URL <https://www.pre-sustainability.com/simapro>
- Proietti, S., Sdringola, P., Desideri, U., Zepparelli, F., Masciarelli, F., Castellani, F., 2013. Life Cycle Assessment of a passive house in a seismic temperate zone. *Energy Build.* 64, 463–472. doi:10.1016/j.enbuild.2013.05.013
- Rahmani Asl, M., Zarrinmehr, S., Bergin, M., Yan, W., 2015. BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization. *Energy Build.* 108, 401–412. doi:10.1016/j.enbuild.2015.09.011
- Ramesh, T., Prakash, R., Shukla, K.K., 2010. Life cycle energy analysis of buildings: An overview. *Energy Build.* 42, 1592–1600. doi:10.1016/j.enbuild.2010.05.007
- Reed, R., Bilos, A., Wilkinson, S., Schulte, K.-W., 2009. International Comparison of Sustainable Rating Tools. *J. Sustain. Real Estate* 1, 1–22. doi:10.5555/jsre.1.1.k679431ll777p066
- REGENER Project, 1996. REGENER Project [WWW Document]. URL [http://www-cep.ensmp.fr/francais/themes/cycle/pdf/cib\\_regener.pdf](http://www-cep.ensmp.fr/francais/themes/cycle/pdf/cib_regener.pdf) (accessed 2.1.17).
- Reijnders, L., Van Roekel, A., 1999. Comprehensiveness and adequacy of tools for the environmental improvement of buildings. *J. Clean. Prod.* 7, 221–225. doi:10.1016/S0959-6526(99)00080-3

## Bibliografía

---

Reinhart, C.F., Cerezo Davila, C., 2016. Urban building energy modeling - A review of a nascent field. *Build. Environ.* 97, 196–202. doi:10.1016/j.buildenv.2015.12.001

Rist, T., 2011. A path to BIM-based LCA for whole-buildings. Ntnu.Edu.

Rivela Carballal, B., 2012. Propuesta metodológica de aplicación sectorial de análisis de ciclo de vida (ACV) para la evaluación ambiental de la edificación en España. Universidad Politécnica de Madrid.

Rosselló-Batle, B., Ribas, C., Moià-Pol, A., Martínez-Moll, V., 2015. An assessment of the relationship between embodied and thermal energy demands in dwellings in a Mediterranean climate. *Energy Build.* 109, 230–244. doi:10.1016/j.enbuild.2015.10.007

Rossi, B., Marique, A.-F.F., Reiter, S., Glaumann, M., Reiter, S., 2012. Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, case study. *Build. Environ.* 51, 402–407. doi:10.1016/j.buildenv.2011.11.002

Roux, C., Schalbart, P., Peuportier, B., 2016. Analyse de cycle de vie conséquentielle appliquée à l'étude d'une maison individuelle, in: *Conférence IBPSA France*. Marne-la-Vallée, pp. 1–8.

Ruiz Alfonsea, M., 2016. Análisis de Ciclo de Vida de modelos de habitación construidos en entornos de clima tropical (Colombia, s. XX-XXI). Tutores: Juan Carlos Gómez de Cózar y Antonio garcía Martínez. MIATD, Universidad de Sevilla.

San-José, J.T., Losada, R., Cuadrado, J., Garrucho, I., 2007. Approach to the quantification of the sustainable value in industrial buildings. *Build. Environ.* 42, 3916–3923. doi:10.1016/j.buildenv.2006.11.013

Sartori, I., Hestnes, A.G., 2007. Energy use in the life cycle of conventional and low-energy buildings: A review article. *Energy Build.* 39, 249–257. doi:10.1016/j.enbuild.2006.07.001

Scheuer, C., Keoleian, G.A., Reppe, P., 2003. Life cycle energy and environmental performance of a new university building: modeling challenges and design implications. *Energy Build.* 35, 1049–1064. doi:10.1016/s0378-7788(03)00066-5

Schlueter, A., Thesseling, F., 2009. Building information model based energy/exergy performance assessment in early design stages. *Autom. Constr.* 18, 153–163. doi:10.1016/j.autcon.2008.07.003

Schwartz, Y., Eleftheriadis, S., Raslan, R., Mumovic, D., 2016. Semantically Enriched BIM Life Cycle Assessment to Enhance Buildings' Environmental Performance, in: *CIBSE Technical Symposium*, Edinburgh, UK. p. 14 pages.

Shadram, F., Johansson, T.D., Lu, W., Schade, J., Olofsson, T., 2016. An integrated BIM-based framework for minimizing embodied energy during building design. *Energy Build.* 128, 592–604. doi:10.1016/j.enbuild.2016.07.007

Shafiq, N., Nurrudin, M.F., Fadhil, Gardezia, S.S.S., Kamaruzzaman, A. Bin, 2015. Carbon footprint assessment of a typical low rise office building in Malaysia using building information modelling (BIM). *Int. J. Sustain. Build. Technol. Urban Dev.* 6, 157–172. doi:10.1080/2093761X.2015.1057876

Shari, Z., Soebarto, V., 2015. Comparative review of existing building performance assessment systems: appropriateness for the context of emerging/developing countries. *Int. J. Sustain. Trop. Des. Res. Pract.* 8, 2–13.

## Bibliografía

Sharma, A., Saxena, A., Sethi, M., Shree, V., Varun, 2011. Life cycle assessment of buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* doi:10.1016/j.rser.2010.09.008

Shen, W., Shen, Q., Sun, Q., 2012. Building Information Modeling-based user activity simulation and evaluation method for improving designer–user communications. *Autom. Constr.* 21, 148–160. doi:10.1016/j.autcon.2011.05.022

Shin, Y., Cho, K., 2015. BIM Application to Select Appropriate Design Alternative with Consideration of LCA and LCCA. *Math. Probl. Eng. Hindawi Publ. Corp.* 14 pages. doi:dx.doi.org/10.1155/2015/281640

Shrivastava, S., Chini, A., 2012. Using building information modeling to assess the initial embodied energy of a building. *Int. J. Constr. Manag.* 12, 51–63.

Silvestre, J.D., de Brito, J., Pinheiro, M.D., 2014. Environmental impacts and benefits of the end-of-life of building materials – calculation rules, results and contribution to a “cradle to cradle” life cycle. *J. Clean. Prod.* 66, 37–45. doi:10.1016/j.jclepro.2013.10.028

Silvestre, J.D., Lasvaux, S., Hodková, J., de Brito, J., Pinheiro, M.D., 2015. NativeLCA - a systematic approach for the selection of environmental datasets as generic data: application to construction products in a national context. *Int. J. Life Cycle Assess.* 20, 731–750. doi:10.1007/s11367-015-0885-8

Singh, A., Berghorn, G., Joshi, S., Syal, M., 2011. Review of Life-Cycle Assessment Applications in Building Construction. *J. Archit. Eng.* 15–23. doi:10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.0000026

SINTEF Building and Infrastructure, CIRCE Foundation, Ecole de Mines – Armines, IFZ, SEC, EMI, KTH, CalCon, 2011. LORE-LCA [WWW Document]. URL <http://www.sintef.no/projectweb/lore-lca/>

SNRCC, 2010. Plan Nacional de respuesta al cambio climático.

Sousa, J., 2012. Energy Simulation Software for Buildings: Review and Comparison. *Inf. Technol. Energy Appl.* 2012 6–7.

Soust-Verdaguer, B., 2012. Estudio de indicadores de sostenibilidad en sistemas de evaluación LEED y HADES aplicados a edificios de uso residencial, cultural y universitario. Tutora: Carmen Llatas Oliver, Universidad de Sevilla.

Spielmann, M., Dones, R., Bauer, C., Tuchschnid, M., 2007. Life cycle inventories of transport services.

Steel, J., Drogemuller, R., Toth, B., 2012. Model interoperability in building information modelling. *Softw. Syst. Model.* 11, 99–109. doi:10.1007/s10270-010-0178-4

Takano, A., Hafner, A., Linkosalmi, L., Ott, S., Hughes, M., Winter, S., 2015a. Life cycle assessment of wood construction according to the normative standards. *Eur. J. Wood Wood Prod.* 73, 299–312. doi:10.1007/s00107-015-0890-4

Takano, A., Hughes, M., Winter, S., 2014a. A multidisciplinary approach to sustainable building material selection: A case study in a Finnish context. *Build. Environ.* 82, 526–535. doi:10.1016/j.buildenv.2014.09.026

Takano, A., Pal, S.K., Kuittinen, M., Alanne, K., Hughes, M., Winter, S., 2015b. The effect of material selection on life cycle energy balance: A case study on a hypothetical building model in Finland. *Build. Environ.* 89, 192–202. doi:10.1016/j.buildenv.2015.03.001

Takano, A., Winter, S., Hughes, M., Linkosalmi, L., 2014b. Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment. *Build. Environ.* 79, 20–30. doi:10.1016/j.buildenv.2014.04.025

## Bibliografía

---

Tavares, S., 2006. Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras. Universidade Federal de Santa Catarina.

The National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T., Tanabe, K. (Eds. ), 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. IGES, Japan.

Thinkstep, 2017. Gabi [WWW Document]. URL <http://www.gabi-software.com/international/solutions/building-lca/> (accessed 1.2.17).

Tillman, A.M., 2000. Significance of decision-making for LCA methodology. Environ. Impact Assess. Rev. doi:10.1016/S0195-9255(99)00035-9

Tindale, A., 2005. DesignBuilder software. Des. Softw. Ltd.

Tingley, D.D., Davison, B., 2011. Design for deconstruction and material reuse. Proc. Inst. Civ. Eng. - Energy 164, 195–204. doi:10.1680/ener.2011.164.4.195

UNEP, 2016. Renewable energy and energy efficiency in developing countries: contributions to reducing global emissions.

UNEP-SBCI, 2014. Situación de la Edificación Sostenible en América Latina.

UNEP-SBCI, 2012. Promoting policies and practices for the built environment.

UNEP-SBCI, 2009. Buildings and Climate Change Summary for Decision-Makers.

UNEP-SCI, 2012. Sustainable Buildings and Climate Initiative. Promoting policies and practices for the built environment.

United Nations Conference, 2016. 22nd Conference of the Parties. Marrakech.

United Nations Conference, United Nations, 2015. Adoption of the Paris agreement, Conference of the Parties on its twenty-first session. Paris.

Varun, Sharma, A., Shree, V., Nautiyal, H., 2012. Life cycle environmental assessment of an educational building in Northern India: A case study. Sustain. Cities Soc. 4, 22–28. doi:10.1016/j.scs.2012.03.002

Verbeeck, G., Hens, H., 2010. Life cycle inventory of buildings: A contribution analysis. Build. Environ. 45, 964–967. doi:10.1016/j.buildenv.2009.10.003

Verbeeck, G., Hens, H., 2009. Life cycle inventory of buildings: A calculation method. Build. Environ. 45, 1037–1041. doi:10.1016/j.buildenv.2009.10.012

VHK for European Commission, 2005. MEEUP. Delft.

Vilches, A., Garcia-Martinez, A., Sanchez-Montañes, B., 2017. Life cycle assessment (LCA) of building refurbishment: A literature review. Energy Build. 135, 286–301. doi:10.1016/j.enbuild.2016.11.042

Volk, R., Stengel, J., Schultmann, F., 2014. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. Autom. Constr. 38, 109–127. doi:10.1016/j.autcon.2013.10.023



## Bibliografía

- Wallhagen, M., Glaumann, M., Malmqvist, T., 2011. Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change - Case study on an office building in Sweden. *Build. Environ.* 46, 1863–1871. doi:10.1016/j.buildenv.2011.02.003
- Wang, C., Cho, Y.K., Kim, C., 2015. Automatic BIM component extraction from point clouds of existing buildings for sustainability applications. *Autom. Constr.* 56, 1–13. doi:10.1016/j.autcon.2015.04.001
- Wang, E., Shen, Z., Ph, D., Berryman, C., 2011. A Building LCA Case Study Using Autodesk Ecotect and BIM Model. *ASC Annu. Int. Conf. Proc.* 47th.
- Wang, J., Li, Z., Tam, V.W.Y., 2014. Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: A Shenzhen case study, China. *Resour. Conserv. Recycl.* 82, 1–7. doi:10.1016/j.resconrec.2013.11.003
- Weissenberger, M., Jensch, W., Lang, W., 2014. The convergence of life cycle assessment and nearly zero-energy buildings: The case of Germany. *Energy Build.* 76, 551–557. doi:10.1016/j.enbuild.2014.03.028
- Welle, B., Haymaker, J., Rogers, Z., 2011. ThermalOpt: A methodology for automated BIM-based multidisciplinary thermal simulation for use in optimization environments. *Build. Simul.* 4, 293–313. doi:10.1007/s12273-011-0052-5
- Welle, B., Rogers, Z., Fischer, M., 2012. BIM-Centric Daylight Profiler for Simulation (BDP4SIM): A methodology for automated product model decomposition and recomposition for climate-based daylighting simulation. *Build. Environ.* 58, 114–134. doi:10.1016/j.buildenv.2012.06.021
- Widiyanto, A., Kato, S., Maruyama, N., Nishimura, A., Sampattagul, S., 2003. Environmental impacts evaluation of electricity grid mix systems in four selected countries using a life cycle assessment point of view, in: 2003 EcoDesign 3rd International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing. pp. 26–33. doi:10.1109/ECODIM.2003.1322633
- Wong, J.K.W., Zhou, J., 2015. Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Autom. Constr.* doi:10.1016/j.autcon.2015.06.003
- Wu, P., Xia, B., Pienaar, J., Zhao, X., 2014. The past, present and future of carbon labelling for construction materials – A review. *Build. Environ.* 77, 160–168. doi:10.1016/j.buildenv.2014.03.023
- Yang, W., Wang, S.S., 2013. A BIM-LCA framework and case study of a residential building in Tianjin, in: *Modeling and Computation in Engineering II - Proceedings of the 2nd SREE Conference on Modeling and Computation in Engineering*, CMCE 2013. pp. 83–88.
- Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M.S., Eskicioglu, C., Sadiq, R., 2013. An overview of construction and demolition waste management in Canada: A lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technol. Environ. Policy* 15, 81–91. doi:10.1007/s10098-012-0481-6
- Yuan, Y., Yuan, J., 2011. The theory and framework of integration design of building consumption efficiency based on BIM, in: *Procedia Engineering*. pp. 5323–5327. doi:10.1016/j.proeng.2011.08.987
- Zabalza Bribián, I., Aranda Usón, A., Scarpellini, S., 2009. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Build. Environ.* 44, 2510–2520. doi:10.1016/j.buildenv.2009.05.001

## Glosario

---

**Análisis del Ciclo de Vida**

Recopilación de las entradas, las salidas y los impactos ambientales potenciales de un sistema del producto durante su ciclo de vida.

ISO-14044:2006

**Análisis del Inventario del Ciclo de Vida (ICV)**

Fase de análisis del ciclo de vida que implica la recopilación y la cuantificación de entradas y salidas para un sistema durante su ciclo de vida.

ISO-14044:2006

**Ciclo de vida**

Etapas consecutivas e interrelacionadas de un producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición ISO-14050:2009

**Declaración ambiental**

Expresión que indica los aspectos ambientales de un bien o servicios.

ISO-15392:2008

**Desempeño**

Habilidad para satisfacer las funciones requeridas bajo condiciones de uso o comportamiento previsto.

ISO-15392:2008

**Desempeño ambiental**

Desempeño relacionado con los impactos ambientales y aspectos ambientales.

ISO-15392:2008

**Edificio**

Obra de construcción que tiene una de sus funciones principales albergar a sus ocupantes o su contenido, normalmente es cerrado y se proyecta para permanecer fijo de forma permanente en un lugar.

EN 15643-1:2010

**Escenario**

Conjunto de hipótesis e información relativa a secuencia esperada de posibles eventos futuros.

EN-15978:2011

**Equivalente funcional**

Requisitos funcionales y/o requisitos técnicos cuantificados de un edificio o un sistema ensamblado (parte de la obra) para su uso como base de comparación.

EN 15804:2012 + A1:2013

## Glosario

---

**Evaluación del desempeño ambiental**

Proceso utilizado para facilitar las decisiones de la dirección con respecto al desempeño ambiental de la organización mediante la selección de indicadores, la recopilación y el análisis de datos, la evaluación de la información comparada con los criterios de desempeños ambiental, los informes y comunicaciones, las revisiones periódicas y mejoras de este proceso.

ISO-14050:2009

**Flujo de energía**

Entrada o resultado de un proceso unitario o sistema del producto, medida en unidades de energía.

ISO-14050:2009

**Herramienta de evaluación ambiental**

Es utilizado para describir una técnica que predice, calcula o estima una o más características del desempeño ambiental de un producto o edificio, ejemplo la energía operacional, la energía incorporada, las emisiones de gases, etc.

(Cole, 2005)

**Impacto**

Cualquier cambio que pueda ser adverso o beneficioso.

ISO-15392:2008

**Impacto ambiental**

Impacto sobre el medioambiente, resultante total o parcial de aspectos ambientales.

ISO-15392:2008

**Límite de sistema**

Interfaz en la evaluación entre un edificio y sus alrededores u otros sistemas de productos.

EN 15978:2011

**Mantenimiento**

Combinación de todas las acciones técnicas y administrativas asociadas durante la vida útil para conservar un edificio o un sistema ensamblado (parte de la obra) en un estado en el que pueda llevar a cabo las funciones requeridas.

EN 15978:2011

**Material auxiliar**

Material que entra y se utiliza en el proceso unitario de obtención del producto, pero no constituye un aparte del producto.

EN 15804:2012 + A1:2013

**Medioambiente / ambiente**

Entorno en el cual una organización opera, incluidos el agua, el suelo, los recursos naturales, la flora, la fauna, los seres humanos y sus interrelaciones.

ISO-14050:2009

## Glosario

---

### **Método de evaluación ambiental**

Es utilizado para describir una técnica que tiene la evaluación como una de sus funciones principales, pero en la cual puede ir acompañada de una verificación de terceros antes de obtener una calificación o etiqueta, incluida la referencia o el uso de un número de herramientas.  
(Cole, 2005)

### **Módulo de información**

Recopilación de datos utilizada como base para la declaración ambiental tipo III, que abarca a un proceso unitario o a una combinación de procesos unitarios que forman parte del ciclo de vida de un producto.  
EN 15804:2012 + A1:2013

### **Período de referencia**

Período durante el que se analizan las características dependientes del tiempo del objeto de la evaluación.  
EN-15978:2011

### **Producto de construcción**

Elemento fabricado o procesado para su incorporación a la obra de construcción.  
EN-15978:2011

### **Proceso unitario**

Elemento más pequeño considerado en el análisis del inventario del ciclo de vida para el cual se cuantifican datos de entrada y salida.

### **Reciclaje**

Operación de tratamiento de residuos que tiene la función de sustituir otros recursos o preparar los residuos para dicho uso.  
EN 15643-1:2010

### **Reglas de categoría de producto (Product Category Rules-PCR)**

Conjunto de procesos unitarios con flujos elementales y flujos de producto, que desempeña una o más funciones definidas, y que sirve de modelo para el ciclo de vida de un producto.  
EN 15804:2012 + A1:2013

### **Sostenibilidad / Sustentabilidad**

Estado en el cual componentes del ecosistema y sus funciones son mantenidas para presentes y futuras generaciones.  
ISO-15392:2008

### **Toma de decisiones**

Proceso mediante el cual se realiza la elección entre diferentes opciones como forma de resolver diferentes requerimientos o exigencias.  
Definición propia

**Unidad funcional**

Desempeño cuantificado de un sistema del producto para su uso como unidad de referencia.  
ISO 14040:2006

**Usuario**

Persona u organización para la que se proyecta un edificio incluyendo el propietario del edificio, el administrador y sus ocupantes.  
EN 15643-1:2010

**Vida útil estimada**

Vida útil esperable de un edificio o de un sistema ensamblado (parte de la obra) para un conjunto específico de condiciones de uso, determinada a partir de los datos de la vida útil de referencia tras considerar las diferencias con las condiciones de referencia.  
EN 15643-1:2010



## **Anexos**

---

Anexo 1.1. Artículos publicados en revistas científicas indexadas en JCR (Q1)

Anexo 1.2. Artículos en fase de revisión en revistas científicas indexadas en SJCR (Q1)

Anexo 2. Documentación complementaria sobre casos de estudio

Anexo 3. Manual de instalación de herramienta *BIM-ACV single-family houses V1.0*

Anexo 4. Comunicaciones a Congresos



## Anexo 1.1

---

### Artículos publicados en revistas indexadas en JCR Q1

#### Artículo I

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.  
*Simplification in life cycle assessment of single-family houses:  
A review of recent developments.*

Building and Environment 103 (2016) 215-227.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014> 0360-1323

#### Artículo II

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.  
*Critical review of BIM-based LCA method to buildings.*

Energy and Buildings 136 (2017) 110–120.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009> 0378-7788

## Artículo I

---

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.  
*Simplification in life cycle assessment of single-family houses:  
A review of recent developments.*

Building and Environment 103 (2016) 215-227.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014> 0360-1323

## Artículo II

---

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.  
*Critical review of BIM-based LCA method to buildings.*

Energy and Buildings 136 (2017) 110–120.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.12.009> 0378-7788

## Anexo 1.2

---

### Artículos en fase de revisión en revistas indexadas en SJCR Q1

#### Artículo III

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez, Juan Carlos Gómez de Cózar.

*BIM-based LCA method to analyze envelope alternatives of a single-family houses:  
case study in Uruguay.*

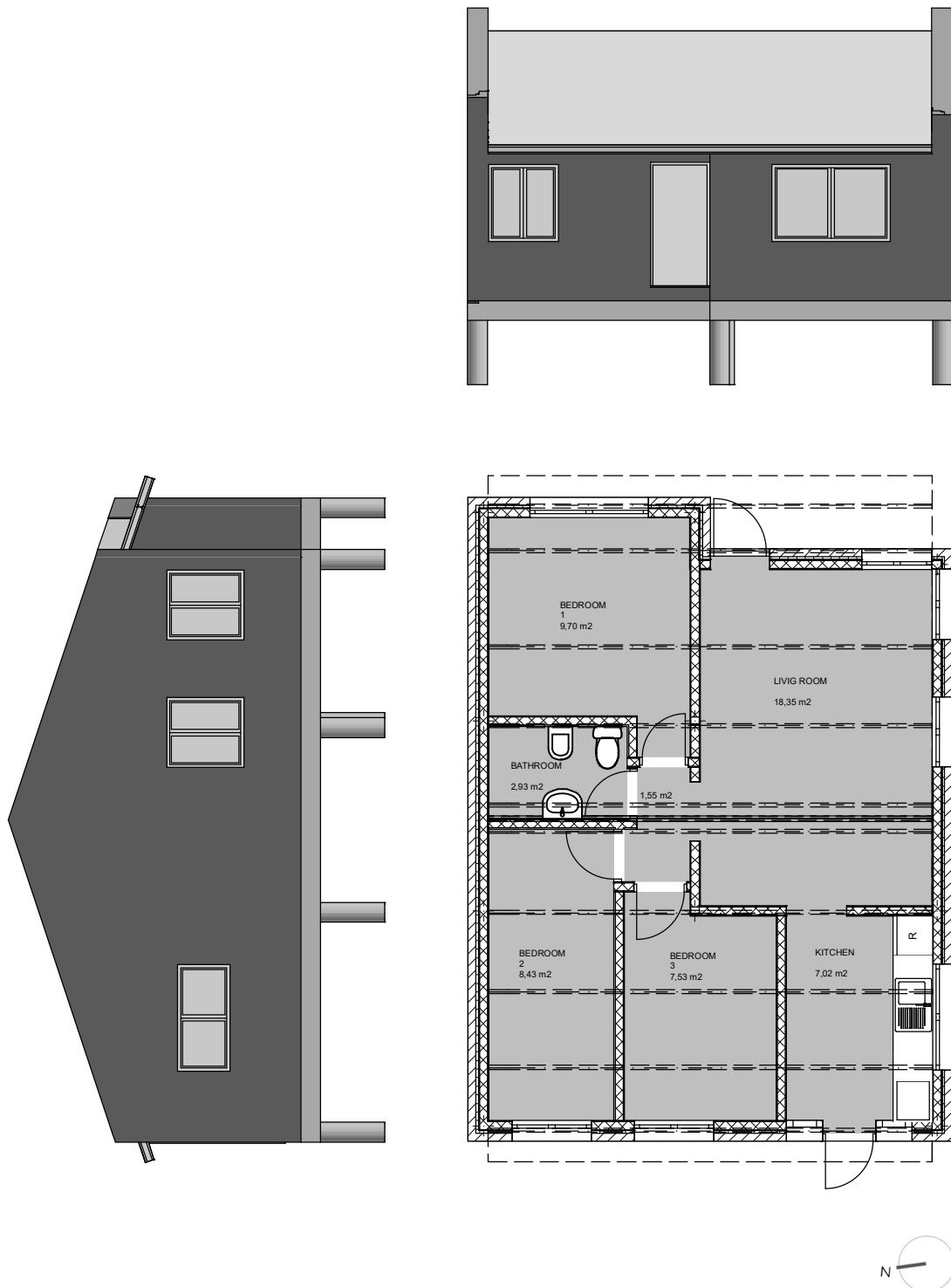
Journal of Architectural Engineering  
Special Issue of Housing in Journal of Architecture Engineering.  
En revisión por pares

## **Anexo 2**

---

Documentación complementaria sobre casos de estudio

**Viviendas evaluadas**  
vivienda "COVISA"



**Vivienda COVISA**  
Esc 1.100



ANEXOS

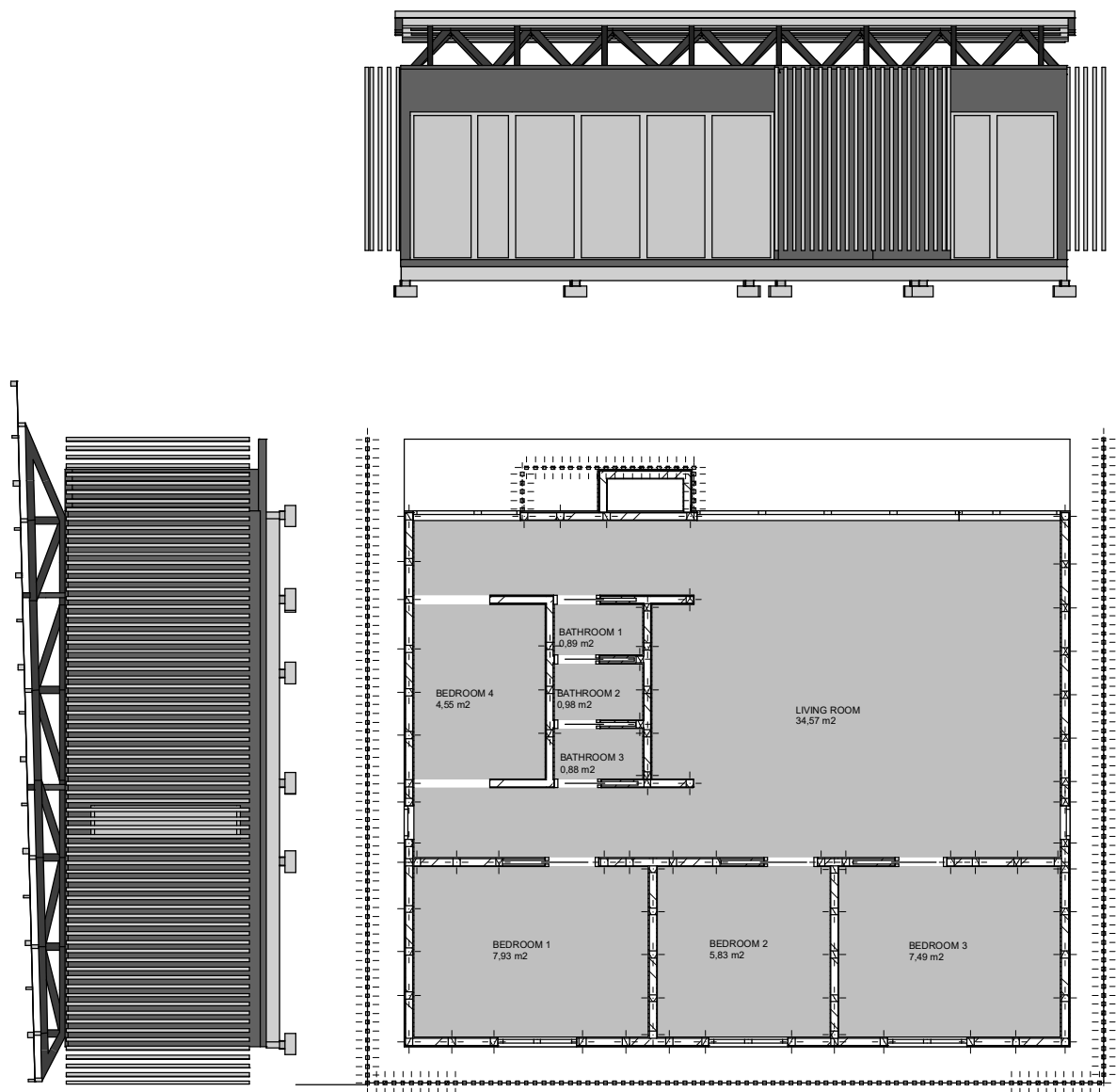
**Viviendas evaluadas  
COVISA**



**MODELOS BIM**

**Análisis del Ciclo de Vida de edificios residenciales.** Propuesta metodológica para el diseño de una herramienta simplificada.

**Viviendas evaluadas**  
“LCU” (La Casa Uruguaya)



**Vivienda LCU**  
Esc 1.100

## ANEXOS

### Viviendas evaluadas

LCU (La Casa Uruguaya)

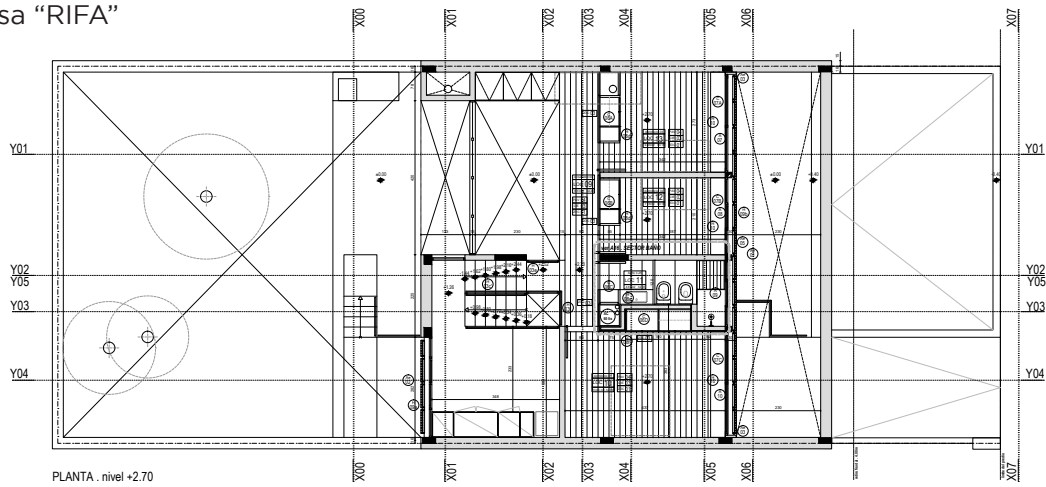


## MODELOS BIM

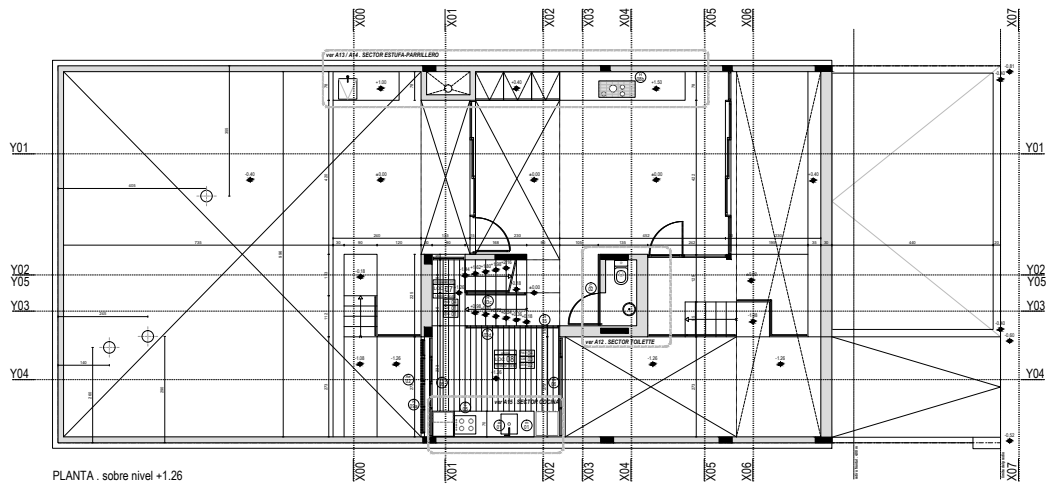
**Análisis del Ciclo de Vida de edificios residenciales.** Propuesta metodológica para el diseño de una herramienta simplificada.

## Viviendas evaluadas

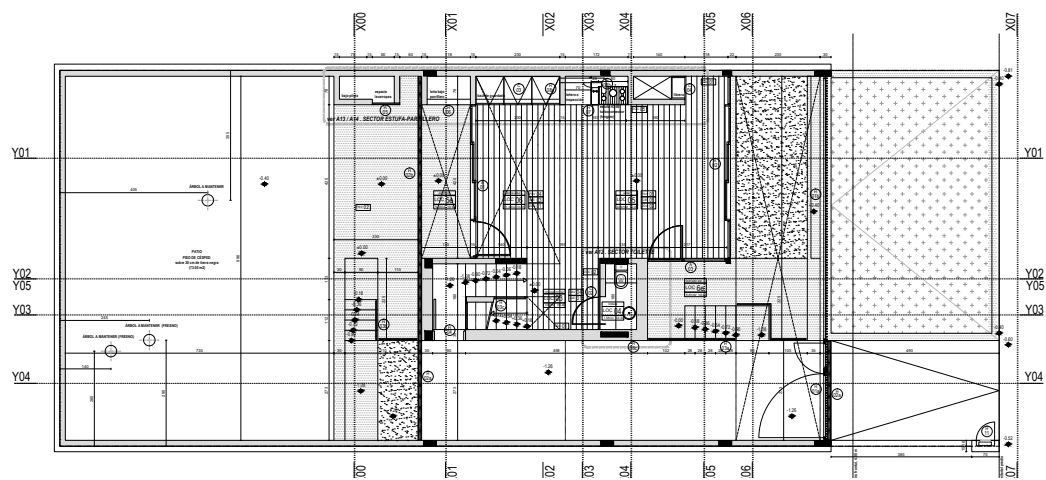
### Casa “RIFA”



PLANTA 1



ENTREPLANTA



## Casa “RIFA”

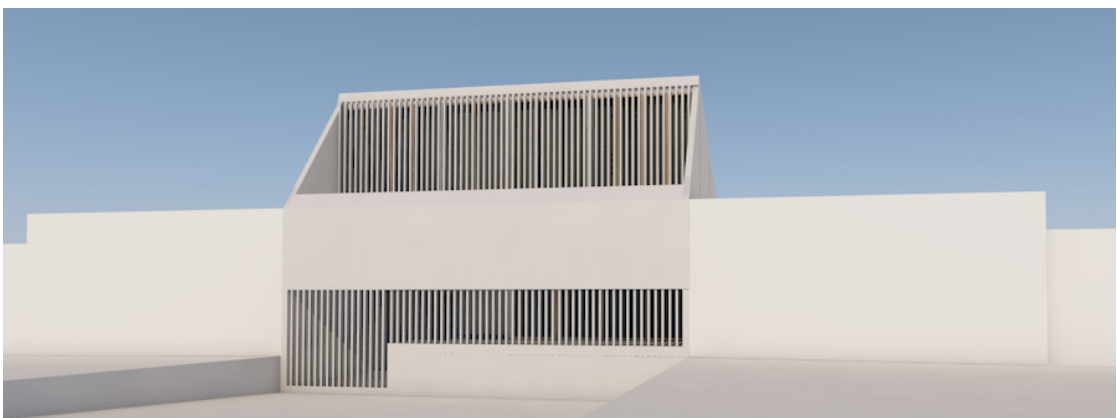
### Esc 1.200



## ANEXOS

### Viviendas evaluadas

Casa "RIFA"



### MODELO BIM

**Análisis del Ciclo de Vida de edificios residenciales.** Propuesta metodológica para el diseño de una herramienta simplificada.



## Características cerramientos

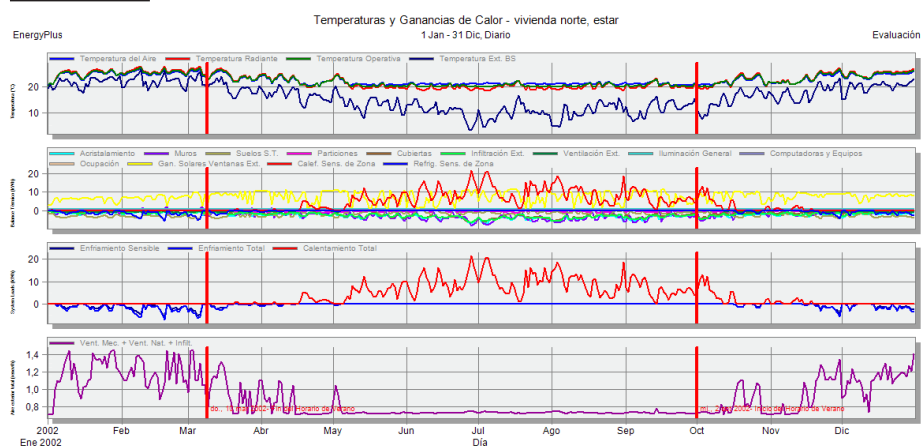
Case study		Description	U-value (W/m <sup>2</sup> .K)
Case 1 Original scenario	External walls	Brick- 12 cm Polystyrene - 3 cm Mortar- 1.5 cm (sand, cement and bitumen) Concrete block- 12 cm Cement mortar- 1.5 cm Paint (interior)	1.089
	External roof	Galvanized Zinc Polyurethane- 3 cm Air chamber 8 cm Polystyrene - 3 cm Cement mortar- 1.5 cm Paint (interior)	0.807
Case 1 Alternative 1 scenario	External walls	Brick- 12 cm Mortar- 1.5 cm Aerated Concrete block- 20 cm Cement mortar- 1.5 cm Paint (interior)	0.626
	External roof	Sandwich panel Sheet steel 0.05cm Polystyrene - 7.4 cm Sheet steel 0.05cm Cement mortar- (1.5 cm) Paint (interior)	0.435
Case 1 Alternative 2 sceanrio	External walls	Paint (exterior) Mortar- 1.5 cm Aerated Concrete block- 20 cm Cement mortar- 1.5 cm Paint (interior)	0.692
	External roof	Galvanized Zinc Glass wool- 8 cm Polystyrene- 3 cm Cement mortar- 1.5 cm Paint (interior)	0.386



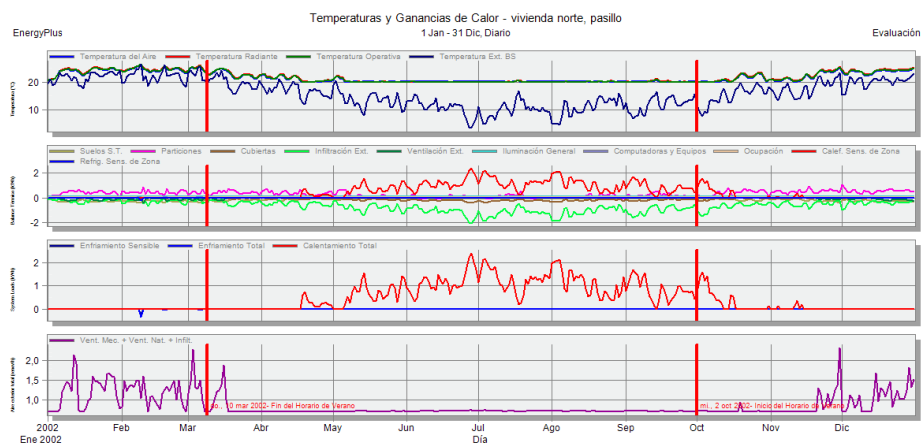
Características cerramientos

Case study		Description	U-value (W/m².K)
Case 2 COVISA	External walls	Brick- 12 cm Polystyrene - 3 cm Mortar- 1.5 cm (sand, cement and bitumen) Concrete block- 12 cm Cement mortar- 1.5 cm Paint (interior)	1.089
	External roof	Galvanized Zinc Polyurethane- 3 cm Air chamber 8 cm Polystyrene - 3 cm Cement mortar- 1.5 cm Paint (interior)	0.807
Case 2 LCU	External walls	Plywood (Exterior) 12 mm Asphalted cardboard 10mm Glass wool 100mm Glass wool 100mm Polyethylene 200 micron Plywood interior 12mm	0.293
	External roof / floor	Plywood (Exterior) 12 mm Glass wool 100mm Glass wool 100mm Polyethylene 200 micron Plywood interior 12mm	0.352
Case 2 RIFA	External walls	Paint (exterior) Mortar- 1.5 cm (sand, cement) Hollow brick 7cm Mortar- 2 cm Hollow brick 17cm Cement mortar- 1.5 cm Paint (interior)	0.653
	External roof	Paint (exterior) Concrete- 7 cm Polystyrene - 10 cm Concrete- 15 cm Cement mortar- 1.0 cm Paint (interior)	0.312

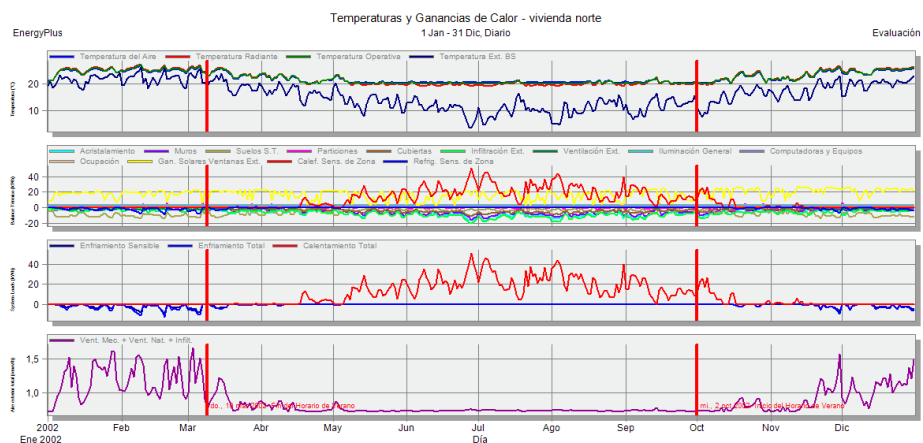
## Estimaciones de demandas energéticas en fase de uso



### Original



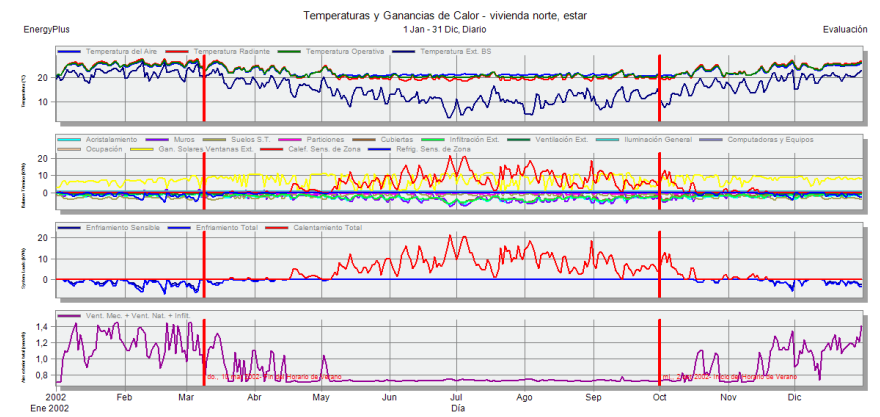
### Alternativa 1



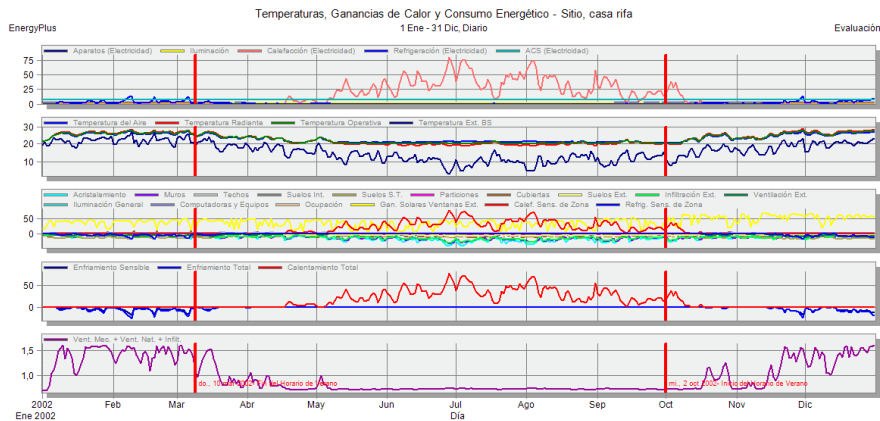
### Alternativa 2

**Análisis del Ciclo de Vida de edificios residenciales.** Propuesta metodológica para el diseño de una herramienta simplificada.

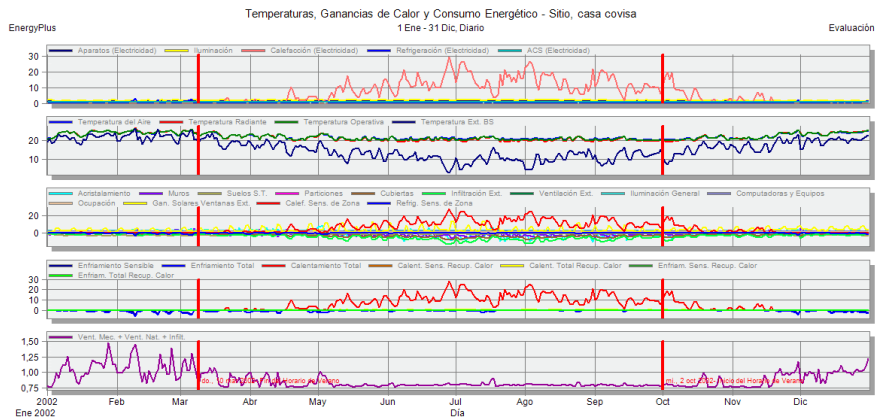
Estimaciones de demandas energéticas en fase de uso



COVISA



RIFA



LCU

Análisis del Ciclo de Vida de edificios residenciales. Propuesta metodológica para el diseño de una herramienta simplificada.

### Caso 1. Escenario *Original*

#### Cuantificación inicial de materiales

BIM material	Volume	Area	Density	Mass	Unit	Quantity
bitumen	0,0425	80,8167	1700	72,1665	kg	72,1665
brick	9,731	80,8167	1600	15569,6013	MJ	43127,7956
ceramic tile	0,5752	57,517	2000	1150,3401	kg	1150,3401
concrete blocks_enevelope	10,0735	80,8167	1400	14102,9391	kg	14102,9391
concrete_floor	11,4492	57,517	1800	20608,597	m3	11,4492
mortar_ceramics	1,1503	57,517	1800	2070,6121	kg	2070,6121
mortar_exterior	1,2034	80,8167	1800	2166,0268	kg	2166,0268
mortar_interior	1,1659	80,8167	1800	2098,5986	kg	2098,5986
mortar_roof	1,245	87,0687	1800	2241,0796	kg	2241,0796
paint_interior	0,0388	80,8167	1500	58,2076	kg	58,2076
paint_roof	0,0419	87,0687	1500	62,8653	kg	62,8653
polystyrene_roof	2,4629	87,0687	20	49,2576	kg	49,2576
polystyrene_wall	2,401	80,8167	20	48,0187	kg	48,0187
polyurethane_roof	2,4867	87,0687	40	99,4683	kg	99,4683
zinc	0,0076	87,0687	7200	54,7129	kg	54,7129
aluminium	0,01018	7,3342	2700	27,50325	kg	27,50325
glass	0,0286	5,7347	2000	57,3470	kg	57,3470
wood	0,1312	3,28	400	52,48	m3	0,1312

### Caso 1. Escenario *Alternative 1*

#### Cuantificación inicial de materiales

BIM material	Volume	Area	Density	Mass	Unit	Quantity
aerated concrete blocks_envelope	15,7154	80,8167	540	8486,3221	kg	8486,3221
brick	9,731	80,8167	1600	15569,6013	MJ	43127,7956
ceramic tile	0,5602	56,0177	2100	1120,3537	kg	1120,3537
concrete_floor	11,1404	56,0177	1900	20052,8047	m3	11,1404
mortar_ceramics	1,1204	56,0177	1525	2352,7428	kg	2352,7428
mortar_exterior	1,2099	80,8167	1525	2540,6689	kg	2540,6689
mortar_interior	1,1547	80,8167	1525	2078,5455	kg	2078,5455
mortar_roof	1,3005	86,7908	1525	2340,9966	kg	2340,9966
paint_interior	0,0384	80,8167	1300	57,6496	kg	57,6496
paint_roof	0,0434	86,7908	1300	65,0901	kg	65,0901
polystyrene_roof	6,3981	86,7908	20	159,9527	kg	159,9527
steel_roof	0,0805	173,5816	7800	627,9469	kg	627,9469
aluminium	0,00823	5,9302	2700	22,23825	kg	22,23825
glass	0,023184	4,6369	2000	46,3690073	kg	46,3690073
wood	0,1312	3,28	400	52,48	m3	0,1312

## Caso 1. Escenario *Alternative 2*

### Cuantificación inicial de materiales

BIM material	Volume	Area	Density	Mass	Unit	Quantity
bitumen	0,0425	80,8167	1700	72,1665	kg	72,1665
brick	9,731	80,8167	1600	15569,6013	MJ	43127,7956
ceramic tile	0,5752	57,517	2000	1150,3401	kg	1150,3401
concrete blocks_enevelope	10,0735	80,8167	1400	14102,9391	kg	14102,9391
concrete_floor	11,4492	57,517	1800	20608,597	m3	11,4492
mortar_ceramics	1,1503	57,517	1800	2070,6121	kg	2070,6121
mortar_exterior	1,2034	80,8167	1800	2166,0268	kg	2166,0268
mortar_interior	1,1659	80,8167	1800	2098,5986	kg	2098,5986
mortar_roof	1,245	87,0687	1800	2241,0796	kg	2241,0796
paint_interior	0,0388	80,8167	1500	58,2076	kg	58,2076
paint_roof	0,0419	87,0687	1500	62,8653	kg	62,8653
polystyrene_roof	2,4629	87,0687	20	49,2576	kg	49,2576
polystyrene_wall	2,401	80,8167	20	48,0187	kg	48,0187
polyurethane_roof	2,4867	87,0687	40	99,4683	kg	99,4683
zinc	0,0076	87,0687	7200	54,7129	kg	54,7129
aluminium	0,01018	7,3342	2700	27,50325	kg	27,50325
glass	0,0286	5,7347	2000	57,3470	kg	57,3470
wood	0,1312	3,28	400	52,48	m3	0,1312



## Caso 2. Vivienda “COVISA”

### Cuantificación inicial de materiales

BIM material	Volume	Area	Density	Mass	Unit	Quantity
bitumen	0,0893	90,5833	1700	151,81	kg	151,81
brick	10,9035	90,5833	1600	17445,6	MJ	48324,312
ceramic tile	0,5598	55,9808	2000	1119,6	kg	1119,6
ceramic_tile_bath	0,723	30,0507	2000	1446	kg	1446
concrete blocks_enevelope	10,5175	90,5833	1400	14724,5	kg	14724,5
concrete blocks_interior	8,1202	68,8511	1400	11368,28	kg	11368,28
concrete_column	0,0988	3,2933	2500	247	m3	0,0988
concrete_floor	11,7212	55,9808	2500	29303	m3	11,7212
concrete_foundation	0,816	10,9476	2150	1754,4	m3	0,816
concrete_slabs	4,1432	63,7732	2500	10358	m3	4,1432
mortar_ceramics	1,1196	55,9808	1800	2015,28	kg	2015,28
mortar_interior	2,9077	198,2348	1800	5233,86	kg	5233,86
mortar_wall	1,3334	90,5833	1800	2400,12	kg	2400,12
paint_interior_wall	0,164	168,1841	1500	246	kg	246
paint_roof	0,0074	73,8191	1500	11,1	kg	11,1
polystyrene_roof	2,2146	73,8191	20	44,292	kg	44,292
polystyrene_wall	3,5768	90,5833	20	71,536	kg	71,536
polyurethane_roof	2,2146	73,8191	40	88,584	kg	88,584
steel_slabs	0,062	99,455	7800	483,6	kg	483,6
zinc	0,1476	73,8191	7200	1062,72	m2	73,8191
aluminium	0,020921544	0	2700	56,4881688	kg	56,4881688
glass	0,0390672	0	2000	78,1344	kg	78,1344
wood	0,585145	0	400	234,058	m3	0,585145

## Caso 2. Vivienda RIFA

### Cuantificación inicial de materiales

BIM material	Volume	Area	Density	Mass	Unit	Quantity
bitumen	0,016	30,1299	1700	27,2	kg	27,2
brick	3,4689	30,1299	1600	5550,24	MJ	15374,1648
brick_hollow	33,9375	304,0996	1800	61087,5	kg	61087,5
concrete_blocks_enevelope	5,1344	41,4612	1400	7188,16	kg	7188,16
concrete_column	3,7849	78,174	2500	9462,25	m3	3,7849
concrete_floor	40,5409	194,8575	2500	101352,25	m3	40,5409
concrete_foundation	2,4459	6,115	2150	5258,685	m3	2,4459
concrete_roof	20,5828	242,1508	2500	51457	m3	20,5828
concrete_slabs	2,4475	49,5748	2500	6118,75	m3	2,4475
concrete_wall	1,7588	11,5026	2500	4397	m3	1,7588
mortar_exterior	11,6413	648,3528	1800	20954,34	kg	20954,34
mortar_floor	3,7754	200,9386	1800	6795,72	kg	6795,72
mortar_interior	1,9045	124,5317	1800	3428,1	kg	3428,1
mortar_roof	1,8161	121,0754	1800	3268,98	kg	3268,98
paint_exterior_wall	0,3845	490,9212	1500	576,75	kg	576,75
paint_interior_wall	0,2592	231,5588	1500	388,8	kg	388,8
paint_roof	0,649	221,5447	1500	973,5	kg	973,5
polystyrene_roof	12,1075	121,0754	20	242,15	kg	242,15
polystyrene_wall	0,5363	30,1299	20	10,726	kg	10,726
steel_roof	0,1662	127,722	7800	1296,36	kg	1296,36
wood_floor	1,0047	100,4693	400	401,88	m3	1,0047
aluminium	0,072156	0	2700	194,8212	kg	194,8212
glass	0,0734352	0	2000	146,8704	kg	146,8704
wood	0,59258	0	400	237,032	m3	0,59258

Caso 2. Vivienda “LCU”

Cuantificación inicial de materiales

BIM material	Volume	Area	Density	Mass	Unit	Quantity
bitumen	0,1554	71,1151	1700	264,18	kg	264,18
glass wool	25,0938	271,9205	50	1254,69	kg	1254,69
paint_exterior_wood	0,3823	463,1983	1500	573,45	kg	573,45
paint_interior_wood	0,1963	191,8567	1500	294,45	kg	294,45
paint_roof	0,0471	94,1083	1500	70,65	kg	70,65
plywood_exterior	2,6778	317,4363	800	2142,24	m3	2,6778
plywood_interior	2,4177	260,9874	675	1631,9475	m3	2,4177
polyethylene	0,0287	140,2458	920	26,404	m3	0,0287
steel_floor	0,0282	6,1962	7800	219,96	m3	0,0282
wood structure_beam	4,8762	161,4596	775	3779,055	m3	4,8762
wood structure_beam roof	1,0574	75,1673	775	819,485	m3	1,0574
wood structure_columns	5,0046	234,2321	775	3878,565	m3	5,0046
wood_floor	0,3506	211,7385	400	140,24	m3	0,3506
polyvinyl chloride	0,0357504	0	1390	49,693056	kg	49,693056
glass	0,0511116	0	2000	102,2232	kg	102,2232
wood	0,510783	0	400	204,3132	m3	0,510783
aluminium	0,006048	0	2700	16,3296	kg	16,3296

## Caso 1. Escenario *Original*

### Cuantificación final de materiales (fase A)

BIM material	basic Material	total	transport	km	ratio t.km
bitumen	bitumen	72,1665	regional level	250	18,04163
brick	brick	32345,8467	local level	50	1617,29234
brick	sand	6289,470192	local level	50	314,47351
brick	cement	898,4957417	regional level	250	224,62394
brick	water	1197,994322	0		0,00000
brick	limestone	1078,19489	regional level	250	269,54872
ceramic tile	ceramic	1265,37411	local level	50	63,26871
ceramic tile	sand	201,3095175	local level	50	10,06548
ceramic tile	cement	1,38040812	regional level	250	0,34510
ceramic tile	water	2,3006802	0		0,00000
concrete blocks_enevelope	concrete block	9872,05737	local level	50	493,60287
concrete blocks_enevelope	sand	2468,014343	local level	50	123,40072
concrete blocks_enevelope	cement	423,088173	regional level	250	105,77204
concrete blocks_enevelope	water	705,146955	0		0,00000
concrete_floor	concrete	12,59412	regional level	250	5667,35400
concrete_floor	reinforced steel	893,0376	continental level	1500	1339,55640
concrete_floor	water	2289,84	0	0	0,00000
mortar_ceramics	sand	362,3571175	local level	50	18,11786
mortar_ceramics	cement	62,118363	regional level	250	15,52959
mortar_ceramics	water	103,530605	local level	50	5,17653
mortar_ceramics	limestone	51,7653025	regional level	250	12,94133
mortar_exterior	sand	16,245201	local level	50	0,81226
mortar_exterior	cement	4,3320536	regional level	250	1,08301
mortar_exterior	water	2,1660268	local level	50	0,10830
mortar_interior	sand	1241,670838	local level	50	62,08354
mortar_interior	cement	209,85986	regional level	250	52,46497
mortar_interior	water	93,27104889	0	0	0,00000
mortar_interior	limestone	209,85986	local level	50	10,49299
mortar_roof	sand	1325,972097	local level	50	66,29860
mortar_roof	cement	224,10796	regional level	250	56,02699
mortar_roof	water	99,60353778	0	0	0,00000
mortar_roof	limestone	224,10796	local level	50	11,20540

## ANEXOS

paint_interior	paint	116,4152	regional level	250	29,10380
paint_interior	water	11,64152	0	0	0,00000
paint_roof	paint	125,7306	regional level	250	31,43265
paint_roof	water	12,57306	0	0	0,00000
polystyrene_roof	polystyrene	51,72048	intercontinental level	15000	775,80720
polystyrene_wall	polystyrene	50,419635	intercontinental level	15000	756,29453
polyurethane_roof	polyurethane	104,441715	intercontinental level	15000	1566,62573
zinc	zinc	91,422135	extra-regional level	600	54,85328
zinc	zinc	0,00870687	extra-regional level	600	0,00522
aluminium	aluminium	28,8784125	continental level	1500	43,31762
glass	glass	60,21441976	extra-regional level	600	36,12865
wood	wood	0,13776	regional level	250	0,03444
wood	paint	0,001312	regional level	250	0,00033
wood	solvents	0,00656	regional level	250	0,00164

## Caso 1. Escenario *Alternative 1*

### Cuantificación final de materiales (fase A)

BIM material	basic Material	total	transport	km	ratio t.km
aerated concrete blocks_envelope	aerated concrete blocks	8375,999913	extra-regional level	600	5025,59995
aerated concrete blocks_envelope	sand	311,8723372	extra-regional level	600	187,12340
aerated concrete blocks_envelope	cement	53,46382923	extra-regional level	600	32,07830
aerated concrete blocks_envelope	water	59,4042547	0	0	0,00000
brick	brick	32345,8467	local level	50	1617,29234
brick	sand	7547,36423	local level	50	377,36821
brick	cement	1293,833868	regional level	250	323,45847
brick	water	1437,593187	0	0	0,00000
ceramic tile	cement	33,610611	regional level	250	8,40265
ceramic tile	ceramic	1232,38907	local level	50	61,61945
ceramic tile	sand	196,0618975	local level	50	9,80309
concrete_floor	concrete	12,25444	regional level	250	5514,49800
concrete_floor	reinforced steel	868,9512	continental level	1500	1303,42680
concrete_floor	water	2228,08	0	0	0,00000
mortar_ceramics	sand	411,72999	local level	50	20,58650
mortar_ceramics	cement	70,582284	regional level	250	17,64557
mortar_ceramics	water	117,63714	local level	50	5,88186
mortar_ceramics	limestone	58,81857	regional level	250	14,70464
mortar_exterior	sand	1587,918063	local level	50	79,39590
mortar_exterior	cement	423,4448167	regional level	250	105,86120
mortar_exterior	water	141,1482722	local level	0	0,00000
mortar_interior	sand	1229,806088	local level	50	61,49030
mortar_interior	cement	207,85455	regional level	250	51,96364
mortar_interior	water	346,42425	0	0	0,00000
mortar_interior	limestone	173,212125	local level	50	8,66061
mortar_roof	sand	1385,089655	local level	50	69,25448
mortar_roof	cement	234,09966	regional level	250	58,52492
mortar_roof	water	260,1107333	0	0	0,00000
mortar_roof	limestone	195,08305	local level	50	9,75415
paint_interior	paint	115,2992	regional level	250	28,82480
paint_interior	water	11,52992	0	0	0,00000



## ANEXOS

paint_roof	paint	130,1802	regional level	250	32,54505
paint_roof	water	13,01802	0	0	0,00000
polyesthyrene_roof	polystyrene	167,950335	intercontinental level	15000	2519,25503
steel_roof	steel	659,344245	extra-regional level	600	395,60655
steel_roof	steel	0,006279469	extra-regional level	600	0,00377
aluminium	aluminium	23,3501625	continental level	1500	35,02524
glass	glass	48,68745767	extra-regional level	600	29,21247
wood	wood	0,13776	regional level	250	0,03444
wood	paint	0,001312	regional level	250	0,00033
wood	solvents	0,00656	regional level	250	0,00164

## Caso 1. Escenario *Alternative 2*

### Cuantificación final de materiales (fase A)

BIM material	basic Material	total	transport	km	ratio t.km
aerated concrete blocks_envelope	aerated concrete blocks	6960,63864	extra-regional level	600	4176,38318
aerated concrete blocks_envelope	sand	1522,639703	extra-regional level	600	913,58382
aerated concrete blocks_envelope	cement	261,023949	extra-regional level	600	156,61437
aerated concrete blocks_envelope	water	290,02661	0		0,00000
ceramic tile	cement	1,43209704	regional level	250	0,35802
ceramic tile	ceramic	1312,75562	local level	50	65,63778
ceramic tile	sand	201,3095175	local level	50	10,06548
ceramic tile	limestone	1,1934142	regional level	250	0,29835
concrete_floor	concrete	13,08186	regional level	250	5886,83700
concrete_floor	reinforced steel	927,6228	continental level	1500	1391,43420
concrete_floor	water	2378,52	0	0	0,00000
glass wool	glass wool	363,01398	extra-regional level	600	217,80839
mortar_ceramics	sand	438,579715	local level	50	21,92899
mortar_ceramics	cement	75,185094	regional level	250	18,79627
mortar_ceramics	water	125,30849	local level		0,00000
mortar_ceramics	limestone	62,654245	regional level	250	15,66356
mortar_exterior	sand	1847,459121	local level	50	92,37296
mortar_exterior	cement	390,308265	regional level	250	97,57707
mortar_exterior	water	260,20551	0		0,00000
mortar_interior	sand	1262,334028	local level	50	63,11670
mortar_interior	cement	213,35223	regional level	250	53,33806
mortar_interior	water	59,26450833	0	0	0,00000
mortar_interior	limestone	256,022676	local level	50	12,80113
mortar_roof	sand	1638,689521	local level	50	81,93448
mortar_roof	cement	276,9616092	regional level	250	69,24040
mortar_roof	water	123,0940485	0	0	0,00000
mortar_roof	limestone	276,9616092	local level	50	13,84808
paint_exterior	paint	123,294	regional level	250	30,82350
paint_exterior	water	12,3294	0	0	0,00000
paint_exterior	paint	118,359	regional level	250	29,58975
paint_interior	water	11,8359	0	0	0,00000

## ANEXOS

paint_roof	paint	130,4646	regional level	250	32,61615
paint_roof	water	13,04646	0	0	0,00000
polystyrene_roof	polystyrene	59,214645	intercontinental level	15000	888,21968
zinc	zinc	91,422135	extra-regional level	600	54,85328
zinc	zinc	0,00870687	extra-regional level	600	0,00522
aluminium	aluminium	23,3501625	continental level	1500	35,02524
glass	glass	48,68745767	extra-regional level	600	29,21247
wood	wood	0,13776	regional level	250	13,77600
wood	paint	0,001312	regional level	250	0,00033
wood	solvents	0,00656	regional level	250	0,00164

## Caso 2. Vivienda “COVISA”

### Cuantificación final de materiales (fase A)

BIM material	basic Material	total	transport	km	ratio t.km
bitumen	bitumen	151,81	regional level	250	37,95250
brick	brick	36243,234	local level	50	1812,16170
brick	sand	7047,2955	local level	50	352,36478
brick	cement	1006,7565	regional level	250	251,68913
brick	water	1342,342	0		0,00000
brick	limestone	1208,1078	regional level	250	302,02695
ceramic tile	ceramic	1231,56	local level	50	61,57800
ceramic tile	sand	195,93	local level	50	9,79650
ceramic tile	cement	33,588	regional level	250	8,39700
ceramic tile	water	2,2392	0		0,00000
ceramic tile	limestone	1,1196	regional level	250	0,27990
ceramic_tile_bath	ceramic	1590,6	local level	50	79,53000
ceramic_tile_bath	sand	253,05	local level	50	12,65250
ceramic_tile_bath	cement	1,7352	regional level	250	0,43380
ceramic_tile_bath	water	2,892	0		0,00000
ceramic_tile_bath	limestone	1,446	regional level	250	0,36150
concrete blocks_enevelope	concrete block	12074,09	local level	50	603,70450
concrete blocks_enevelope	sand	1546,0725	local level	50	77,30363
concrete blocks_enevelope	cement	265,041	regional level	250	66,26025
concrete blocks_enevelope	water	441,735	0		0,00000
concrete blocks_enevelope	limestone	220,8675	regional level	250	55,21688
concrete blocks_interior	concrete block	9321,9896	local level	50	466,09948
concrete blocks_interior	sand	1193,6694	local level	50	59,68347
concrete blocks_interior	cement	204,62904	regional level	250	51,15726
concrete blocks_interior	water	341,0484	0		0,00000
concrete blocks_interior	limestone	170,5242	regional level	250	42,63105
concrete_column	concrete	0,10868	regional level	250	0,02717
concrete_column	reinforced steel	38,532	continental level	1500	57,79800
concrete_column	water	19,76	0		0,00000
concrete_column	wood	0,02964	extra-regional level	600	7,11360
concrete_floor	concrete	12,89332	regional level	250	3,22333
concrete_floor	reinforced steel	914,2536	continental level	1500	1371,38040

## ANEXOS

concrete_floor	water	2344,24	0		0,00000
concrete_floor	wood	1,17212	extra-regional level	600	281,30880
concrete_foundation	concrete	0,8976	regional level	250	0,22440
concrete_foundation	reinforced steel	318,24	continental level	1500	477,36000
concrete_foundation	water	163,2	0		0,00000
concrete_foundation	wood	0,0816	extra-regional level	600	19,58400
concrete_slabs	concrete	4,55752	regional level	250	1,13938
concrete_slabs	reinforced steel	1615,848	continental level	1500	2423,77200
concrete_slabs	water	828,64	0		0,00000
concrete_slabs	wood	0,41432	extra-regional level	600	99,43680
mortar_ceramics	sand	352,674	local level	250	88,16850
mortar_ceramics	cement	60,4584	regional level	250	15,11460
mortar_ceramics	water	100,764	local level	50	5,03820
mortar_ceramics	limestone	50,382	regional level	250	12,59550
mortar_interior	sand	3716,0406	local level	50	185,80203
mortar_interior	cement	628,0632	regional level	250	157,01580
mortar_interior	water	1046,772	0	0	0,00000
mortar_interior	limestone	523,386	local level	50	26,16930
mortar_wall	sand	1800,09	local level	50	90,00450
mortar_wall	cement	480,024	regional level	250	120,00600
mortar_wall	water	240,012	local level	50	12,00060
paint_interior_wall	paint wall	492	local level	50	24,60000
paint_interior_wall	water	49,2	0		0,00000
paint_roof	paint roof	22,2	regional level	250	5,55000
paint_roof	water	2,22	0		0,00000
polystyrene_roof	polystyrene	46,5066	intercontinental level	15000	697,59900
polystyrene_wall	polystyrene	75,1128	intercontinental level	15000	1126,69200
polyurethane_roof	polyurethane	93,0132	intercontinental level	15000	1395,19800
steel_slabs	steel	507,78	extra-regional level	600	304,66800
zinc	zinc	77,510055	extra-regional level	600	46,50603
zinc	zinc	0,00738191	extra-regional level	600	0,00443
aluminium	aluminium	59,31257724	continental level	1500	88,96887
glass	glass	82,04112	extra-regional level	600	49,22467
wood	wood	0,61440225	regional level	250	0,15360
wood	paint	0,00585145	regional level	250	0,00146
wood	solvents	0,02925725	regional level	250	0,00731

## Caso 2. Vivienda RIFA

### Cuantificación final de materiales (fase A)

BIM material	basic Material	total	transport	km	ratio t.km
bitumen	bitumen	27,2	regional level	250	6,80000
brick	brick	11530,6236	local level	50	576,53118
sand	sand	2242,0657	local level	50	112,10329
cement	cement	320,2951	regional level	250	80,07378
water	water	427,0601333	0		0,00000
limestone	limestone	384,35412	regional level	250	96,08853
brick hollow	brick hollow	48870	local level	50	2443,50000
sand	sand	7126,875	local level	50	356,34375
cement	cement	1018,125	regional level	250	254,53125
water	water	1357,5	0		0,00000
limestone	limestone	1221,75	regional level	250	305,43750
concrete block	concrete block	5894,2912	local level	50	294,71456
sand	sand	754,7568	local level	50	67928,11200
cement	cement	129,38688	regional level	250	32,34672
water	water	143,7632	0	0	0,00000
limestone	limestone	129,38688	regional level	250	32,34672
concrete structure	concrete	3,7849	regional level	250	0,94623
reinforced steel	reinforced steel	1476,111	continental level	1500	2214,16650
water	water curing	756,98	0		0,00000
wood	wooden formwork	1,13547	extra-regional level	600	272,51280
concrete	concrete	40,5409	regional level	250	10,13523
reinforced steel	reinforced steel	3162,1902	continental level	1500	4743,28530
water	water curing	8108,18	0		0,00000
wood	wooden formwork	4,05409	extra-regional level	600	972,98160
concrete foundations	concrete	2,4459	regional level	250	0,61148
reinforced steel	reinforced steel	190,7802	continental level	1500	286,17030
water	water curing	489,18	0	0	0,00000
wood	wooden formwork	0,24459	extra-regional level	600	58,70160
concrete structure	concrete	20,5828	regional level	250	5,14570
reinforced steel	reinforced steel	1605,4584	continental level	1500	2408,18760
water	water curing	4116,56	0		0,00000
wood	wooden formwork	2,05828	extra-regional level	600	493,98720



## ANEXOS

concrete structure	concrete	2,4475	regional level	250	0,61188
reinforced steel	reinforced steel	954,525	continental level	1500	1431,78750
water	water curing	489,5	0		0,00000
wood	wooden formwork	0,4895	extra-regional level	600	117,48000
concrete structure	concrete	1,7588	regional level	250	0,43970
reinforced steel	reinforced steel	685,932	continental level	1500	1028,89800
water	water curing	351,76	0		0,00000
wood	wooden formwork	0,35176	extra-regional level	600	84,42240
sand	sand	15715,755	local level	50	785,78775
cement	cement	4190,868	regional level	250	1047,71700
water	water	2095,434	local level	50	104,77170
sand	sand	4757,004	local level	50	237,85020
cement	cement	543,6576	regional level	250	135,91440
water	water	1087,3152	0		0,00000
sand	sand	2399,67	local level	50	119,98350
cement	cement	274,248	regional level	250	68,56200
water	water	548,496	0		0,00000
limestone	limestone	274,248	local level	50	13,71240
sand	sand	2288,286	local level	50	114,41430
cement	cement	261,5184	regional level	250	65,37960
water	water	523,0368	0		0,00000
limestone	limestone	261,5184	local level	50	13,07592
paint wall	paint	1153,5	regional level	250	288,37500
water	water	115,35	0		0,00000
paint wall	paint	777,6	regional level	250	194,40000
water	water	77,76	0		0,00000
paint roof	paint	1947	regional level	250	486,75000
water	water	194,7	0		0,00000
polystyrene	polystyrene	254,2575	intercontinental level	15000	3813,86250
polystyrene	polyesthyrene	11,2623	intercontinental level	15000	168,93450
steel	steel	1361,178	intercontinental level	15000	20417,67000
wood	wood	1,054935	regional level	250	0,26373
paint	paint	4,0188	regional level	250	1,00470
solvents	solvents	20,094	regional level	250	5,02350
aluminium	aluminium	204,56226	extra-regional level	600	122,73736
glass	glass	204,56226	extra-regional level	600	122,73736
wood	wood	0,622209	regional level	250	0,15555
paint	paint	2,37032	regional level	250	0,59258
solvents	solvents	11,8516	regional level	250	2,96290

## Caso 2. Vivienda “LCU”

### Cuantificación final de materiales (fase A)

BIM material	basic Material	total	transport	km	ratio t.km
bitumen	bitumen	264,18	regional level	250	66,04500
glass wool	glass wool	1254,69	extra-regional level	600	752,81400
paint_exterior_wood	paint wood	1146,9	regional level	250	286,72500
paint_exterior_wood	water	114,69	0	0	0,00000
paint_interior_wood	paint wood	588,9	regional level	250	147,22500
paint_interior_wood	water	412,23	0	0	0,00000
paint_roof	paint roof	141,3	regional level	250	35,32500
paint_roof	water	14,13	0	0	0,00000
plywood_exterior	plywood exterior	2,67780	extra-regional level	600	1245,17700
plywood_interior	plywood interior	2,41770	extra-regional level	600	1124,23050
polyethylene	polyethylene	0,0287	regional level	250	0,00718
steel_floor	steel	0,00705	continental level	1500	0,01058
wood structure_beam	wood structure	4,87620	extra-regional level	600	2267,43300
wood structure_beam roof	wood structure	0,010574	extra-regional level	600	4,91691
wood structure_columns	wood structure	0,050046	extra-regional level	600	23,27139
wood_floor	wood	0,35060	extra-regional level	600	163,02900
wood_floor	paint wood	1,40240	extra-regional level	600	0,84144
wood_floor	solvents	7,01200	extra-regional level	600	4,20720
polyvinyl chloride	polyvinyl chloride	49,69306	intercontinental level	15000	745,39584
glass	glass	102,22320	extra-regional level	600	61,33392
wood	wood	0,510783	extra-regional level	600	237,51410
wood	paint wood	2,043132	extra-regional level	600	1,22588
wood	solvents	10,21566	extra-regional level	600	6,12940
aluminium	aluminium	16,3296	intercontinental level	15000	244,94400

## **Anexo 3**

---

Manual de instalación de herramienta  
*BIM-based LCA single-family houses versión beta*

# Manual de instalación aplicación BIM-based LCA

## 1. Introducción

Para el despliegue de la aplicación BIM BASED LCA visor de resultados son necesarios 3 puntos fundamentales:

- Servidor de aplicaciones (por ejemplo Tomcat 7).
- War de la aplicación.
- Conexión a los ficheros de información.

Vamos a explicar cada uno de los puntos anteriores.

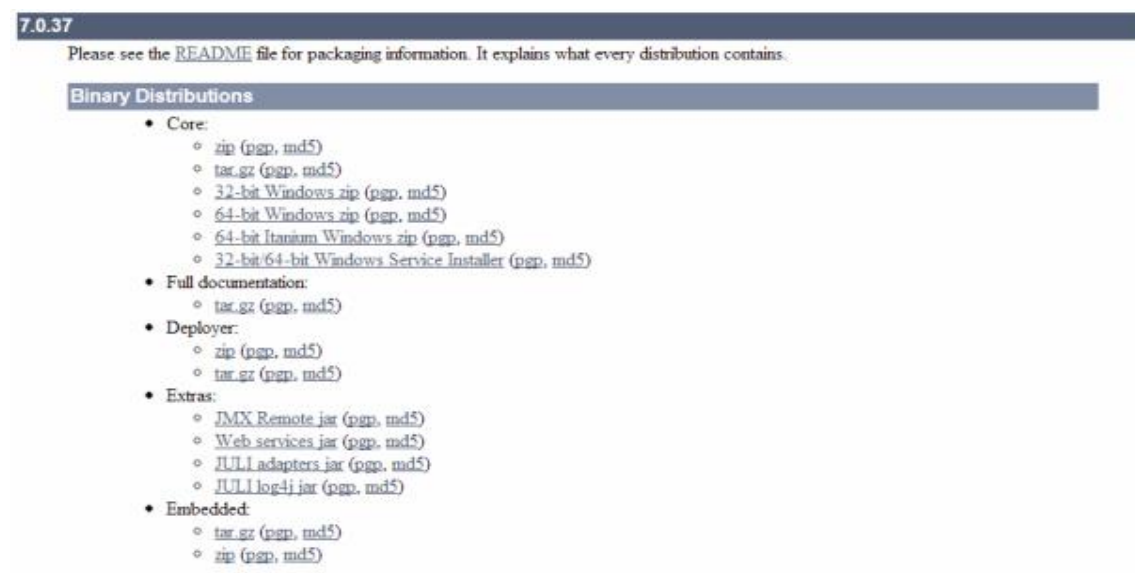
## 2. Servidor de Aplicaciones

Un servidor de aplicaciones es un tipo de servidor incluido en una red, encargado de ejecutar determinados programas. Generalmente, es el que se ocupa de gestionar la mayor parte de las funciones de lógica de negocio y acceso a datos de una aplicación. Las principales ventajas de usar servidores de aplicaciones son la centralización y disminución de la complejidad en el desarrollo de aplicaciones. El servidor de aplicaciones será el encargado de ofrecer servicios software a otros equipos cliente. La versión de Apache Tomcat utilizada en este manual es la 8.

Dentro del paquete de instalación se incluye el ejecutable: **apache-tomcat-8.5.15**

En caso contrario pueden descargarla, para ello hay que ir a la Web de apache y acceder al proyecto Tomcat. <http://tomcat.apache.org/download-70.cgi> De entre todas las versiones, hay que bajar la siguiente: "32-bit/64-bit Windows Service installer".

## Ilustración 1 - Pantalla descarga del Tomcat

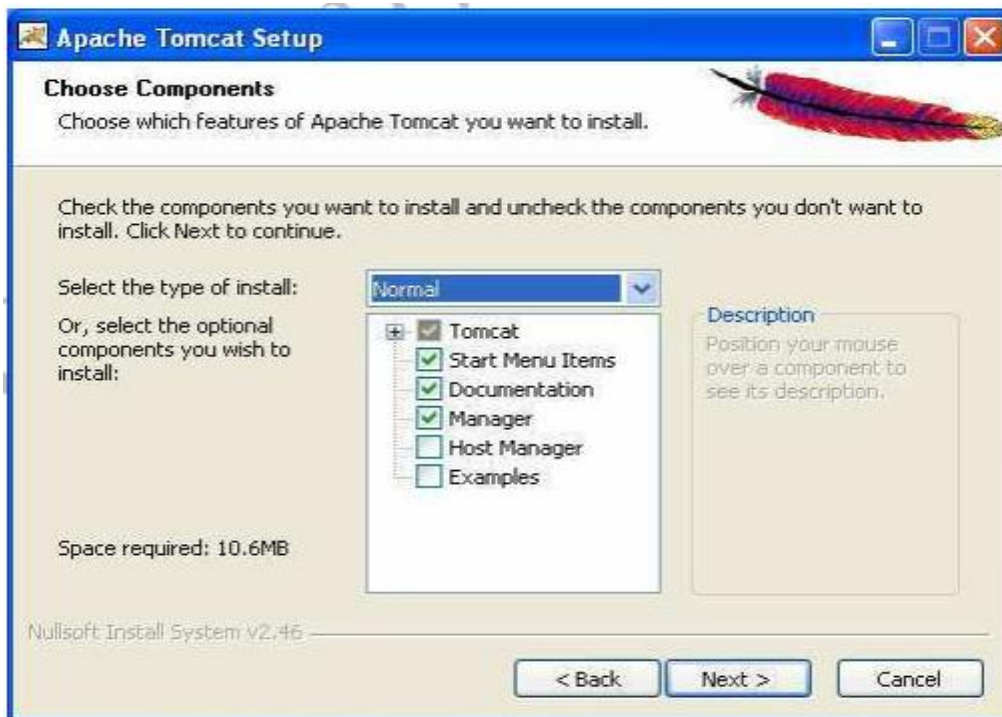


Hacemos doble click sobre el instalador.

## Ilustración 2 - Pantalla inicial de la instalación de Tomcat



Después de aceptar el acuerdo de licencia, se debe seleccionar el tipo de instalación que se va a realizar. Dejar la opción por defecto ("Normal") y pulsar "Siguiente".



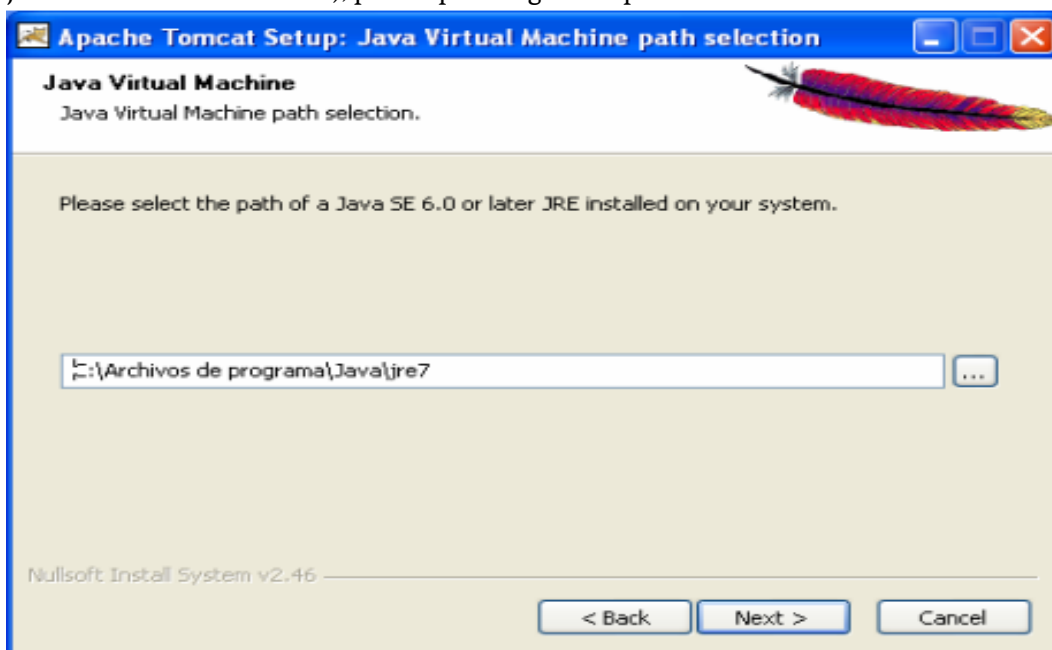
### Ilustración 3 - Selección del tipo de instalación

El siguiente paso será indicar el puerto de escucha de Tomcat, así como el nombre de usuario y contraseña para la administración. Por defecto usuario y contraseña será "admin". Tomcat por defecto se instala en el puerto (8080).



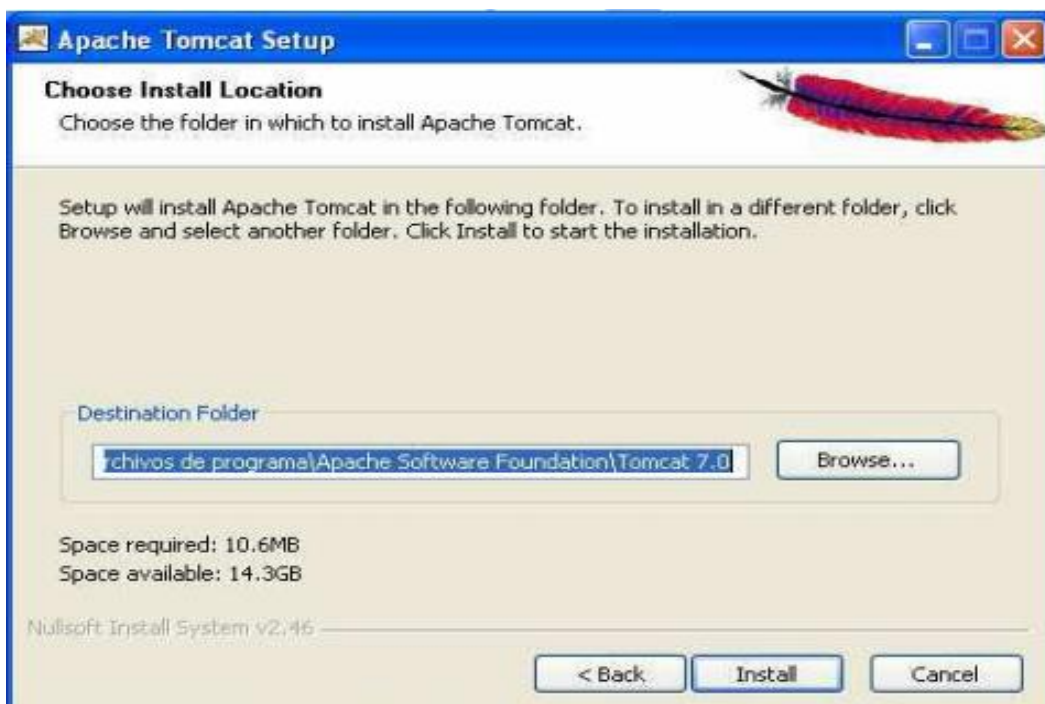
#### Ilustración 4 - Selección de puerto y credenciales de administración

Para que Tomcat pueda funcionar, necesita tener instalado el entorno de ejecución de Java (JRE – Java Runtime Environment), por lo que el siguiente paso es indicar la ruta de instalación de Java.



#### Ilustración 5 - Ruta de JRE

A continuación, hay que indicar la ruta de la instalación de Tomcat.





### Ilustración 6 - Selección de ruta para Tomcat

Por último, pulsar sobre "Install" para iniciar la instalación de Tomcat



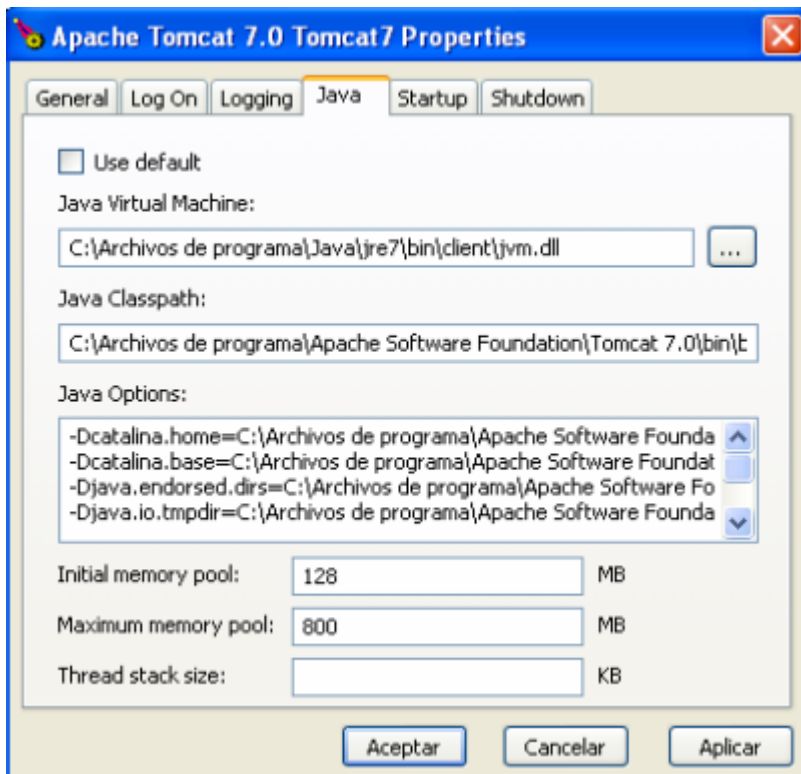
### Ilustración 7 - Fin de la instalación de Tomcat

Al finalizar la instalación, se inicia el servicio de Tomcat. Se puede comprobar que junto al reloj de Windows aparece ahora el símbolo de que Apache Tomcat está ejecutándose.



### Ilustración 8 - Icono de Tomcat como Servicio

Haciendo doble click sobre el icono, accedemos a la configuración del servicio de Tomcat. Vamos a configurar la memoria de la que dispondrá Tomcat. Para ello, en la pestaña "Java", modificar los valores de "Initial memory pool" y "Maximum memory pool", poniendo los valores de la imagen siguiente:



### Ilustración 9 Configuración de memoria de Tomcat

Añadir además, en el recuadro de "Java Options" la siguiente línea  
-Djava.awt.headless=true-XX:MaxPermSize= Para comprobar que Tomcat está funcionando correctamente, abrir un navegador y en la barra de direcciones escribir la siguiente dirección <http://localhost:8080> Si durante la instalación se ha cambiado el puerto por defecto, sustituir en la dirección anterior el "8080" por el número del puerto indicado en la instalación. Debería aparecer la siguiente pantalla:



## Gestor de Aplicaciones Web de Tomcat

Mensaje:

### Gestor

[Listar Aplicaciones](#) [Ayuda HTML de Gestor](#) [Ayuda de Gestor](#) [Estado de Servidor](#)

### Aplicaciones

Trayectoria	Versión	Nombre a Mostrar	Ejecutándose	Sesiones	Comandos
/	Ninguno especificado	Welcome to Tomcat	true	0	<div> Avancar Parar Recargar Replegar </div> <div> Expirar sesiones: <input type="text" value="sin trabajar"/> 30 minutos </div>
/docs	Ninguno especificado	Tomcat Documentation	true	0	<div> Avancar Parar Recargar Replegar </div> <div> Expirar sesiones: <input type="text" value="sin trabajar"/> 30 minutos </div>
/manager	Ninguno especificado	Tomcat Manager Application	true	1	<div> Avancar Parar Recargar Replegar </div> <div> Expirar sesiones: <input type="text" value="sin trabajar"/> 30 minutos </div>

### Desplegar

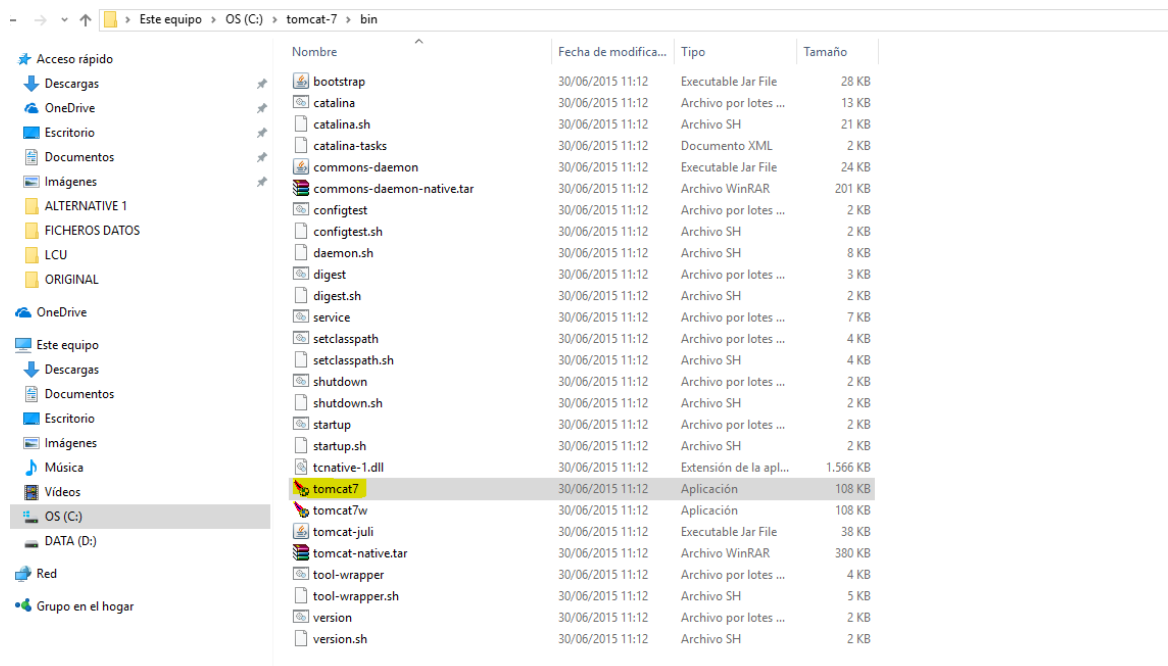
### 3. Despliegue de la aplicación.

Con el servidor tomcat parado. Copiamos el fichero **lcaBim.war** de la carpeta instalador y a continuación nos vamos a la carpeta donde tengamos instalado el tomcat y buscamos la carpeta webapps. Por ejemplo en nuestro caso:

**C:\tomcat-7\webapps**

Y pegamos en esa carpeta el lcaBim.war copiado anteriormente.

A continuación arrancamos el servidor de aplicaciones tomcat, haciendo doble click sobre el ejecutable **C:\tomcat-7\bin\tomcat7.exe**



### 4. Conexión con los archivos de información.

Copiamos la carpeta llamada BIM BASED LCA situada dentro de la carpeta instalador, en nuestra **unidad c:/**

### 5. Acceso a la aplicación.

Realizamos doble click sobre el enlace directo llamado **lcbim** de la carpeta instalador o escribimos en nuestra navegador de internet:

**<http://localhost:8080/lcaBim/inicio>**

## Anexo 4

---

### Comunicación I

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.

*Simplificaciones aplicadas al Análisis del Ciclo de Vida de viviendas*

Libro de Comunicaciones Científicas de Greencities (2015). Málaga. pág. 181-196.

### Comunicación II

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.

*Propuesta metodológica simplificada para la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) en  
tipologías de viviendas unifamiliares*

Libro de Comunicaciones Científicas de Greencities (2016). Málaga

## Comunicación I

---

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.

*Simplificaciones aplicadas al Análisis del Ciclo de Vida de viviendas*

Libro de Comunicaciones Científicas de Greencities (2015). Málaga. pág. 181-196.

## **SIMPLIFICACIONES APLICADAS AL ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA DE VIVIENDAS**

Bernardette Soust-Verdaguer

Carmen Llatas-Oliver

Antonio García-Martínez

Universidad de Sevilla

### **Resumen**

*A nivel mundial se reconoce la existencia de más de 600 métodos y herramientas para la evaluación ambiental de los edificios. La aplicación del Análisis del Ciclo de Vida como (ACV) herramientas de evaluación constituye una las más completas. De acuerdo a lo definido por el marco normativo ISO 14040 su aplicación se basa en 4 etapas, la definición de los alcances y objetivos del sistema, la elaboración del inventario del ciclo de vida, la elaboración de impactos del ciclo de vida y finalmente la interpretación de los datos obtenidos. Su aplicación en el sector de la edificación encierra prejuicios sobre su complejidad y dificultad, esto hace que se haga necesaria la incorporación de simplificaciones al procedimiento atendiendo a sus impactos y repercusiones en la representatividad de los resultados obtenidos.*

*Este trabajo persigue a través de una revisión bibliográfica de trabajos desarrollados en los estos últimos años, identificar y analizar simplificaciones posibles. Se identifican las etapas en cuales han sido desarrolladas, se definen sus propósitos y consecuencias en los resultados obtenidos. Los resultados obtenidos muestran la disparidad de criterios y herramientas utilizadas durante la incorporación de simplificaciones aplicación de la metodología. Las mayores simplificaciones limitan la aplicación del análisis a las fases de producción de materiales y consumo energético en fase de uso.*

**Palabras clave:** *análisis del ciclo de vida simplificado; evaluación de impactos ambientales; Indicadores de impacto ambiental.*

**Área temática:** *Impactos ambientales del sector residencial, Análisis del ciclo de vida.*

### **Abstract**

*Existence of more than 600 methods and tools for environmental assessment of buildings is globally recognized. Life Cycle Analysis (LCA) is one of the most complete. According to the regulatory framework defined by the ISO 14040, it is based on 4 stages: defining the scope and*



*objectives of the system, life cycle inventor (LCI), life-cycle impacts assessment (LCIA) and finally the interpretation. Its application in the building sector holds prejudices about complexity and difficult. Simplifications are necessary, taking into account their impact and repercussions on representativeness of results.*

*This work aims through a literature review of recent works, identify and analyze possible simplifications. Simplifications are identified by stages, purpose and consequences in the results. Results show the disparity of criteria and tools for incorporating simplifications application of the methodology. Major simplifications limit the application of LCA to the stages of materials production and operational energy.*

**Keywords:** *simplified LCA; environmental assessment impacts; environmental impact indicators.*

## 1. Introducción

Los actuales problemas ambientales han derivado en la necesidad de desarrollar una serie de medidas tendientes a reducir el impacto que producen las actividades humanas en el medioambiente. Esta serie de medidas han tenido como objetivo el control de las emisiones de CO<sub>2</sub>, la mejora en la eficiencia y el ahorro en el consumo de recursos. Su aplicación al espacio construido ha estado marcada entre otros por el desarrollo de metodologías y herramientas de evaluación ambiental.

Las metodologías y herramientas de evaluación ambiental han surgido hace más de veinte años y constituyen unos de los principales instrumentos en los que se basa la construcción sostenible. Cole (1998) y Ding (2008) afirman que la evaluación ambiental de edificios ha emergido como uno de los instrumentos de mayor importancia en la construcción sostenible, donde la metodología BREEAM (Gran Bretaña) ha sido la que marcó el inicio (Cole, 2005). En este período relativamente corto, las sucesivas generaciones de estos instrumentos han evolucionado como resultado de experiencia acumulada, los nuevos conocimientos y enfoques adquiridos (Cole, 2005).

La evolución de metodologías y herramientas de evaluación medioambiental ha sido creciente en los últimos años, sumado al agravamiento de los problemas ambientales y la urgencia existente en la búsqueda de respuestas desde diversos sectores, se hace cada vez más necesario el desarrollo de métodos más exhaustivos que amplíen el rango de consideraciones ambientales (Ding, 2004). Diversos estudios reconocen la existencia de cerca de 600 métodos y herramientas existentes en todo el mundo, que evalúan en diferente grado e intensidad aspectos sociales, económicos y ambientales vinculados al sector de la construcción (Reed et al, 2009).

A nivel general es posible clasificar estas herramientas y métodos de evaluación en dos grupos, retomando los criterios establecidos por Reijnders y van Roekel (1999); el primer grupo de evaluaciones indica la relativa “responsabilidad ambiental” definida por un número de características exigidas sobre el desempeño ambiental del edificio. Este grupo llamado “credit-weighting” scale (Sev, 2011), o check-list (Llatas et al, 2010) consiste en la aplicación en una lista de verificaciones o sugerencias a incorporar en las etapas de diseño y construcción del edificio, donde en la mayoría de los casos está asociada a la asignación de calificaciones y procesos de certificaciones. Por otra parte estos métodos y herramientas en general se basan en evaluaciones de tipo cualitativo del desempeño ambiental del edificio. Estos sistemas establecen dependiendo el método o la herramienta distintos rangos donde se puede alcanzar certificaciones o umbrales de calidad.

El segundo grupo de herramientas, se basa en la aproximación al Análisis del Ciclo de Vida (ACV) del edificio, cuyo marco normativo se inicia a partir de las serie de normas ISO 14040 (ISO, 2006) y continua con las serie Europea de normas EN 15643 (ISO, 2012), entre otras. Estos instrumentos permiten realizar una evaluación ambiental cuantitativa del desempeño ambiental del edificio (Reijnders & Roekel, 1999). A diferencia de los métodos y herramientas de evaluación tipo check-list, estas nos aportan información sobre el impacto que causan los edificios en el ambiente durante todas las fases de su Ciclo de Vida, diseño- construcción- uso y demolición.

## 2. Metodología de ACV

Esta metodología tiene por función la evaluación cuantitativa de los materiales utilizados, los flujos energéticos y los impactos ambientales que causan los productos utilizados (Sharma et al, 2011). Esta técnica se basa en cuantificación de los impactos ambientales causados por un producto durante todo su ciclo de vida, es decir desde la “cuna a la tumba”, (from cradle to gate). Se entiende al Ciclo de Vida como las “etapas consecutivas e interrelacionadas de un sistema o producto, desde la adquisición de materia prima o de su generación a partir de recursos naturales hasta la disposición final” (ISO, 2010).

La metodología ACV se define como la “recopilación y evaluación de las entradas y las salidas y los impactos ambientales potenciales de un producto a través de su Ciclo de Vida” (ISO, 2010). Para el proceso de aplicación la norma ISO 14040 establece 4 etapas: la definición de los objetivos, alcances del sistema y la unidad funcional, el inventario del ciclo de vida (LCI), la evaluación de impactos del ciclo de vida (LCIA), y la interpretación.

En la primera fase, definición los objetivos y alcances del sistemas, es donde se establecen la aplicación del estudio, el público a quien irá dirigido, el alcance y el nivel de detalle con el que serán comunicados los resultados. De acuerdo a lo establecido por la norma ISO 14040 esta información puede irse modificando a medida que vayan recopilando los datos e información (ISO, 2006). La unidad funcional tendrá como objetivo “proporcionar una referencia a la cual se relacionen las entradas y las salidas del sistema” (ISO, 2006). Esta deberá reflejar la función que nos interesa de los productos comparados (Perre Fullana, 1997). El sistema comprende los procesos y elementos que participan en el proceso de fabricación, transporte de componentes del producto y materias primas, así como el resto de las fases que componen el ciclo de vida del producto (Perre Fullana, 1997). De modo que los límites del sistema serán los que definen los procesos unitarios que será incluidos en el sistema (ISO, 2006).

La segunda fase de análisis del inventario del ciclo de vida, incluye la “recopilación de los datos y procedimientos de cálculo para determinar las entradas y las salidas al sistema” (ISO, 2006). Esta fase deberá incluir los procedimientos de cálculos y la asignación de flujos y de emisiones y vertido (ISO, 2006).

La siguiente fase se trata de la evaluación de impactos del análisis del ciclo de vida, tiene el propósito de asociar los datos obtenidos en las fases de inventario y asociarlos con las categorías de impacto y con los indicadores de esas categorías (ISO, 2006). Esta fase consta de 3 pasos importantes: la selección de los impactos en función de los objetivos y alcances del trabajo, la asignación de los resultados del inventario según las categorías de impactos seleccionadas (clasificación) y por último el cálculo de las categorías de impacto (Buyle, 2013).

Por último la fase de interpretación tiene por objetivo llegar a resultados coherentes con el alcance los objetivos del estudio, “que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones” (ISO, 2006).

### 3. Dificultades y potencialidades de usos en el sector de la construcción

La utilidad que presenta este tipo de herramientas aplicada a este sector es ampliamente reconocida (ANNEX 31, 2001; REGENER, 1997; ENSLIC, 2010; LoRE-LCA, 2012). Su aplicación al sector de la construcción supone una ayuda a definir estrategias comunes a los diferentes actores que participan en este sector, así como también permite establecer relaciones entre flujos de materiales y los procesos que intervienen en el edificio (Oyarzo & Peuportier, 2014). Su utilidad principal es la de cuantificar los impactos producidos por los edificios durante todo su ciclo de vida, así como también posibilitar la estimación de consumos de recursos, con el fin de evaluar y establecer medidas para reducir los impactos ambientales.

A pesar de sus potencialidades, su aplicación en edificios aún no está tan extendida. Algunas de las principales dificultades que presentan su aplicación radican en la extensa y exhaustiva cantidad de información requerida, así como también el grado de conocimiento requerido sobre la aplicación de la metodología y manejo de los procedimientos de cálculo de indicadores de impacto.

Otro de los actuales inconvenientes que tiene su aplicación es la diferencia entre los métodos, dado que para casos idénticos pueden obtenerse resultados diferentes (Buyle, 2013). Dependiendo del método utilizado será la importancia que se le asigna a cada categorías de impacto, en consecuencia esto puede derivar en diferentes medidas para la reducción de las cargas ambientales (Buyle, 2013). Por otra parte hay una escasa exigencia y obligatoriedad por parte de sectores públicos, vacío legal y normativo y escasos incentivos para su aplicación (Zabalza et al, 2009).

Los técnicos arquitectos, que intervienen desde la fases iniciales configuración del edificio tienen prejuicios sobre la complejidad, precisión y arbitrariedad de los resultados (Zabalza et al, 2009). Es decir que se requieren procedimientos muy complejos para obtener los datos y la información necesaria, esto hace que muchas veces que la aplicación de los procedimientos de cálculo sea muy compleja y costosa en términos económicos.

Otra de la barreras es el escaso conocimiento sobre los impactos ambientales, sus potencialidades de uso así como de los procedimientos de cálculo, a esto también se le suma la escasa demanda en la aplicación de este tipo de metodologías (Zabalza et al, 2009). La falta de herramientas informáticas estandarizadas que puedan llevar adelante este tipo de procedimientos, ajustándose a todas las etapas de diseño y definición de la construcción.

Para los sectores que intervienen en los cálculos y verificaciones del desempeño energético, este tipo de metodologías les resulta de escasa conexión con estos aspectos (Zabalza et al, 2009).

#### **4. Avances sobre su aplicación en edificios**

Su aplicación en la evaluación ambiental de edificios ha ido incrementándose en los últimos años, así como también su rol en diferentes fases del edificio, tanto como herramienta de evaluación de productos como herramienta de ayuda a la toma de decisiones “life cycle thinking” (Buyle, 2013).

En ese sentido se destaca el desarrollo de Proyectos Europeos que han perseguido fomentar y facilitar su incorporación en el sector de la construcción. Se destaca entre ellos el proyecto ANNEX 31 (2001), en el que se detallan las etapas de la aplicación del método, las dificultades y potenciales de su utilización en este sector. Proyectos como REGENER (1996-1997), ENSLIC

(2007-2010), LoRE-LCA (2010-2011), PRESCO (2004) han buscado sentar las bases y promover la utilización de estos instrumentos a escala europea.

Su aplicación en edificios puede definirse a través de varios niveles, y de ellos depende la fiabilidad y el rigor con el que aplica la metodología. En un primer nivel de aplicación parcial se sitúa la utilización de base de datos de materiales, hasta llegar al nivel más exhaustivo, donde se tienen en cuenta todos los procesos y elementos.

De acuerdo a la clasificación que establece el proyecto ENSLIC las metodologías de análisis del ciclo de vida aplicadas a la evaluación ambiental de edificios pueden agruparse de acuerdo a las características y el propósito de la aplicación, en 3 grupos: básica, media y avanzado. La definición de alcances y objetivos, la definición de inventarios y los instrumentos de cálculos son las etapas claves de cara a esta clasificación.

Las herramientas más básicas, que requieren menor grado de especialización o conocimientos previos sobre el uso de la herramienta, aportarán datos más generales y menos precisos, mientras que el uso de herramientas que requieren un mayor nivel de especialización en su uso, permite obtener datos más precisos.

**Tabla 1. Principales herramientas de aplicación para el cálculo de ACV en edificios. (Elaboración propia, basado en ENSLIC)**

<b>Clasificación según niveles de aplicación</b>	<b>Nombre de instrumento (herramienta de cálculo o base de datos)</b>
<b>Parcial aplicada sólo a productos de la construcción:</b> Bases de datos de productos.	Bees, Bedec, Ecoinvent,
<b>Básica aplicada a todo edificio:</b> Herramienta que permite obtener con pocos datos sobre el edificio, obtener algunas categorías de impacto. No es necesario poseer experiencia para su manejo.	ENSLIC excel tool
<b>Media aplicada a todo edificio:</b> Herramienta que requiere un algo de experiencia para su manejo. Permite obtener datos estimados sobre los impactos, introduciendo información más detallada sobre el edificio.	Ecosoft, EcoEffect, NovaEquer, Legep, Envest, Beat, OGIP, GreenCalc, Athena

---

**Avanzado aplicada a todo edificio:**

Simapro, Gabi,

Requiere formación específica en el tema para el manejo del software y la interpretación de los resultados.

---

Esta diferenciación posibilita la aplicación de los distintos tipos de instrumentos de acuerdo las etapas en que se encuentra y los actores para los que esté dirigido. Cada una de estas herramientas asume para el proceso de aplicación la incorporación de simplificaciones, las cuales incidirán en los resultados obtenidos.

### 5. Incorporación de simplificaciones

Varios trabajos (Viola, 2012; Lascaux, 2010; Kashkooli, 2013, Zabala et al, 2009; Kellenberger & Althaus, 2009; Malmqvist et al, 2011; Ortiz et al, 2010) reconocen la necesidad de incorporar simplificaciones en el proceso de aplicación de esta metodología a la evaluación de edificios. Sobre todo para ampliar el campo de aplicación hacia las etapas iniciales del proceso de diseño, reduciendo el esfuerzo en la adquisición de los datos y posibilitando que los resultados obtenidos puedan ser interpretados independientemente del grado de especialización de los técnicos. Así como también obtener resultados que sean más exactos y precisos en etapas desde las etapas iniciales del proceso de diseño. La clave está en conocer hasta qué punto este tipo de simplificaciones puede llegar a alterar la representatividad de los resultados obtenidos mediante la aplicación del método completo.

La norma UNE 150041-1998 (UNE, 1998) establece los principales lineamientos de las simplificaciones aplicables al método. En esta se define que las simplificaciones posibles se colocan del lado del análisis de inventario y la simplificación en la evaluación de impactos. Esto implica que la simplificación permite excluir a los elementos menos significativos de del análisis, así como también se permite la limitación del número de categorías de impacto mediante su clasificación en obligatorias y opcionales (UNE, 1998).

Esta norma exige que se incluyan detalles sobre las razones de la simplificación, el tratamiento de las omisiones, los motivos y razones para realizar las simplificaciones, y la descripción detallada de la metodología aplicada.

La aplicación de estas simplificaciones para el caso de edificios residenciales ha ido incrementándose en los últimos años. A continuación a través de la revisión de publicaciones académicas se elaboran las siguientes tablas resumen que recogen resultados sobre las

principales simplificaciones aplicadas en 10 casos relevantes de aplicación del análisis de ciclo de vida en casos residenciales.

**Tabla 2. 10 relevantes casos que incorporan simplificaciones en las etapas de aplicación de la metodología (Fase de definición de objetivos y alcances, Fase de inventario de ciclo de vida).**

	Autores	Año	País	Fase 1 Definición de objetivos y alcances	Fase 2 Inventario del ciclo de vida
1	Basbagill et al	2013	EEUU	Se incluye producción de materiales. En fase de uso, consumo de energía, mantenimiento y reparación.	Utiliza BIM model del edificio para cuantificar materiales y componentes.  Incluye: Subestructura, envolvente, interiores, servicios.
2	Cuéllar-Franca & Azapagic	2012	Reino Unido	Incluye extracción de materiales, fabricación de materiales y combustibles, transporte al sitio de construcción.  En fase de uso se incluye el consumo de agua, consumo de energía para calefacción, cocina, iluminación, y uso doméstico.  Se incluye el mantenimiento: sustitución de ventanas, puertas y pavimentos.  En la fase final se incluye tareas de demolición y tratamiento de residuos como su reutilización y reciclaje.	Incluye los siguientes componentes: -paredes (exteriores e internas) -techo -falso techo -estructura -puertas exteriores -ventanas -materiales de terminaciones interiores y exteriores
3	Hernández-Sánchez	2013	España	Sólo incluye: extracción y transporte de las materias primas hasta la fábrica, manufactura del producto y su transporte hasta la obra, utilización de energía para calefacción y ACS durante la vida estimada del edificio, utilización de maquinaria para la deconstrucción y transporte de residuos hasta el vertedero.	Sólo incluye componentes y materiales utilizados en la construcción: -Paredes -Cimentaciones -Techo -Ventanas -Puertas



					(Sólo se incluyen los materiales principales, materiales aislante y polímeros).
4	Kashkooli	2013	Reino Unido	Sólo incluye materiales en fase de producción, consumo energético en fase de uso. El transporte en fase de producción no se incluye.	Sólo incluye componentes y materiales básicos: -paredes (exteriores, adiabáticas e internas) -Cimentaciones (interiores exteriores, contacto con el terreno) -techo -Ventanas y puertas
5	Ortiz et al	2010	Colombia España	Se incluye fase de producción y transporte de materiales, energía consumida en fase de construcción y tratamiento de los residuos de obra.  En fase de uso se incluye el mantenimiento, (pintado, sustitución de pavimentos, sustitución de ventanas, cocina y equipamiento de baño) . Consumo de energía, para calefacción y refrigeración, iluminación, agua caliente sanitaria, cocina y uso de equipamientos domésticos.  En fase final del edificio se incluye, consumo de energía para la utilización de maquinaria de demolición, residuos generados para el desmantelamiento de los materiales, transporte a vertedero	Sólo se incluyen principales materiales: hormigón, mortero, ladrillo, acero, baldosas cerámicas, PVC, estructura de madera, tejas (techo), fibrocemento, yeso, aluminio, poliestireno, pintura alquídica, vidrio.
6	Oyarzo et al.	2014	Chile	Se incluye producción y transporte de materiales, construcción y proceso de tratamiento de los residuos de la construcción, uso (consumo de energía y agua, residuos domésticos y su tratamiento), renovación (reemplazo de elementos como ventanas, pintura), fase final del edificio (demolición y tratamiento final de los residuos).	Se incluyen componentes principales de: -paredes (exteriores e internas) -techo -suelo -ventanas

7	Rossi et al	2012	Bélgica, Portugal, Suecia	Se incluye producción y transporte de materiales, construcción y proceso de tratamiento de los residuos de la construcción, uso (consumo de energía y agua, residuos domésticos y su tratamiento), renovación (reemplazo de elementos como ventanas, pintura), fase final del edificio (demolición y tratamiento final de los residuos).	Sólo incluye componentes y materiales básicos: -paredes (exteriores e internas) -cimentaciones -techo -ventanas -pavimentos
				No se tienen en cuenta las variaciones en las distancias de transporte de cada caso en particular.	
8	Viola	2012	Suiza	Incluye fases de producción de materiales, fase de construcción, fase de uso: utilización de energía para calefacción agua caliente y ventilación, fase de deconstrucción.	Sólo incluye los siguientes componentes: -paredes (exteriores e internas) -techo -falso techo -estructura -puertas exteriores -ventanas
9	Wallhagen et al.	2011	Suecia	Sólo incluye materiales en fase de producción, consumo energético en fase de uso. El transporte en fase de producción no se incluye.	Sólo incluye componentes y materiales básicos: -paredes -forjado inferior (sanitario) -techo -ventanas
10	Zabalza et al	2009	España	Sólo incluye materiales en fase de producción de materiales y consumo energético en fase de uso.	Sólo incluye componentes y materiales básicos: -paredes (exteriores, adiabáticas e internas) -Cimentaciones (interiores exteriores, contacto con el terreno) -techo -Ventanas y puertas

**Tabla 3. 10 relevantes casos que incorporan simplificaciones en las etapas de aplicación de la metodología (Fase evaluación de impactos del ciclo de vida).**

Fase 3					
Evaluación de impactos					
Autores	Definición de indicadores	Cálculo de indicadores de impacto			
		Herramienta utilizada para el cálculo	Base de datos utilizada	Cálculo de Consumo Energético en fase de uso	
1	Basbagill et al	Calentamiento global, consumo de recursos, carcinogenicidad	Excel	Athena Eco-calculator Costlab	eQUEST
2	Cuéllar-Franca & Azapagic	Potencial de calentamiento global, acidificación, potencial de agotamiento de recursos abióticos, potencial de eutrofización, potencial de agotamiento de la capa de ozono, potencial de toxicidad humana, potencial de ecotoxicidad terrestre, potencial de ecotoxicidad del agua dulce, potencial de ecotoxicidad del agua de mar, potencial de generación de ozono fotoquímico.	Gabi	Ecoinvent	Estimaciones estadísticas basadas en Brinkley
3	Hernández-Sánchez	Se limita a cambio climático y uso de energía no renovable	Simapro	Ecoinvent v2	Calener-Lider
4	Kashkooli	Se limita a Energía embebida y Consumo de energía.	Excel (Energía embebida y consumo de energía)	No se especifica	Ecotect 2011

5	Ortiz et al	Se limita definir 2 categorías de indicadores: de impacto y de eco-eficiencia.  Indicadores de impacto: Acidificación potencial, Potencial de calentamiento global, toxicidad humana, agotamiento de recursos abióticos, agotamiento de ozono estratosférico.  Indicadores de eco-eficiencia: Uso de recursos, energía renovables, energía no renovable, uso de agua, potencial de calentamiento global	Gabi	Ecoinvet V2.01	Design builder
6	Oyarzo et al.	Se limita definir indicadores de consumo y de impacto: consumo de energía, consumo de agua, consumo de recursos, producción de residuos, potencial de calentamiento global, eutrofización, acidificación, salud humana, biodiversidad, producción de residuos radioactivos, potencial de formación de oxidación fotoquímica, olor.	Nova Equer	Ecoinvent	PLEIADES-COMFIE con adaptación matemática al clima chileno
7	Rossi et al.	Se limita a Emisiones de CO <sub>2</sub> , Energía embebida, Consumo de energía, Carbono en fase de uso.	Equer	Ecoinvent, IISI 2002	PLEIADES-COMFIE
8	Viola	Cambio climático, agotamiento de ozono, toxicidad humana, formación de oxidación fotoquímica, formación de partículas, radiaciones ionizantes, acidificación terrestre, eutrofización del agua dulce, eutrofización del agua de mar, ecotoxicidad	Simapro	Econvent	Swiss standard SIA 380/1

		terrestre, ecotoxicidad del agua dulce, ecotoxicidad del agua de mar, ocupación del suelo agrícola, ocupación del suelo urbano, transformación de la naturales, agotamiento del agua, agotamiento de metales, agotamiento de fósiles			
9	Wallhagen et al.	Se limita a energía primaria y emisiones de CO <sub>2</sub> , en materiales y consumo energético en fase de uso.	Excel (Enslit tool)	Ecoinvent, EcoEffect	Estimaciones estadísticas
10	Zabalza et al.	Se limita a energía primaria y emisiones de CO <sub>2</sub> , en materiales y consumo energético en fase de uso.	Excel (Emisiones de CO <sub>2</sub> y EE)	Bedec	Calener y Lider

## 6. Discusión de resultados

Los resultados obtenidos muestran la disparidad de criterios y herramientas utilizadas durante la incorporación de simplificaciones aplicación de la metodología.

La tabla 2 muestra que en las primeras 2 fases de aplicación del método, las etapas de procesos de materiales y de consumo de energía han sido incluidas en todos los trabajos analizados. En las etapas de inventario los casos que han utilizado las herramientas básicas, coinciden con la incorporación de las mayores simplificaciones al ACV.

Las herramientas que utilizan softwares específicos de ACV para edificios realizan menos simplificaciones en estas etapas, pero debe haber un grado de definición material mayor sobre el edificio durante todo su ciclo de vida.

En la tabla 3 se constata que la bases de datos más utilizadas han sido la Ecoinvent, utilizada en el 70% de los caso analizados. Por otra parte la elección de los indicadores de impacto ha sido distinta en cada uno de los casos, el único indicador que comparten casi la totalidad de los casos es el de cambio climático (emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera).

A nivel general se constata que los resultados obtenidos de los procesos de aplicación del ACV no obedecen a las mismas reglas, ya que han sido calculados aplicando diferentes simplificaciones, llegando algunas a ser aplicaciones parciales del método. Esto invalida la comparación de resultados, ya que responden a criterios y objetivos diferentes.

## 7. Conclusiones

Este trabajo demuestra el creciente interés que ha venido teniendo la aplicación del método del ACV como estrategia para mejorar la calidad ambiental en el sector de la construcción. Por otra parte se ha podido constatar la tendencia existente hacia incorporar simplificaciones. Los resultados obtenidos revelan que el foco de atención en este tipo de simplificaciones está puesto en la cuantificación de principales materiales -en fase de producción- y el consumo energético -en fase de uso-.

Se ha podido comprobar que la incorporación de simplificaciones facilita la aplicación del ACV en edificio y permite su utilización en procesos iniciales del diseño, pero los resultados obtenidos revelan que sólo corresponden a aplicaciones parciales del método (limitadas a emisiones de CO<sub>2</sub> y energía incorporada). Se plantea el desafío de avanzar en herramientas de diseño y evaluación que incorporen la mayor cantidad de fases del producto e información sobre el mismo, sin que esto implique demasiados esfuerzos en las fases de inventario y evaluación de impactos.

## 8. Referencias

- Annex 31, 2001, International Energy Agency, <http://annex31.wiwi.uni-karlsruhe.de/> (02-06-2015)
- Basbagill, J. Flager, F. Lepech, M. Fischer M. (2013) Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment* 60, 81e92
- Buyle M.; Braet J.; Audenaert A. (2013) Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 379–388
- Cole, R.J. 1998, Emerging trends in building environmental assessment methods. *Building Research & Information*. *Building Research & Information*, 26:1, 3-16
- Cole, R. J., 2005, Building environmental assessment methods: redefining intentions and roles, *Building Research & Information*, 33(5), 455-467
- Cuéllar-Franca R. M.; Azapagic A. (2012) Environmental impacts of the UK residential sector: Life cycle assessment of houses. *Building and Environment* 54 86e99
- Ding, G.K.C. 2004. The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities, Thesis, University of Technology, Sydney, (02/02/2015) <http://hdl.handle.net/2100/281>

EN 2012. UNE-EN 15643-1:2012. Sostenibilidad en la construcción. Evaluación de la sostenibilidad de los edificios. Parte 1: Marco general

ENSLIC Project. [https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/enslic-building/\(02-06-2015\)](https://ec.europa.eu/energy/intelligent/projects/en/projects/enslic-building/(02-06-2015))

Hernández-Sánchez, J. (2013) Metodología basada en ACV para la evaluación de sostenibilidad en edificios. PhD Thesis. Universitat Politècnica de Catalunya.

ISO 2006. UNE-EN ISO 14040:2006. Gestión ambiental. Análisis de ciclo de vida. Principios y marco de referencia.

Kashkooli S., A, (2013) *A Critical Building Lifecycle Assessment Framework for Building Designers and Decision Makers*, PhD Thesis. The University of Sheffield School of Architecture.

Kellenberger D.& Althaus H. (2009) Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment* 44, 818–825

Llatas, C., García A., Roveri A., Huete, R., (2010) Una Aproximación a la Evaluación de la Eco-Eficiencia en Edificios. Herramientas Básicas, Proceedings of Congreso Sb10mad. Edificación Sostenible, Revitalización y Rehabilitación de Barrios. 28-30 April 2010, Gbce, Madrid, pp. 1-11

Lasvaux. S (2010) Etude d'un modele simplifie pour l'analyse de cycle de vie des batiments. PhD Thesis. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.

LoRE-LCA Project. [http://www.sintef.no/projectweb/lore-lca/\(02-06-2015\)](http://www.sintef.no/projectweb/lore-lca/(02-06-2015))

Malmqvist T.; Glaumann M.; Scarpellini S.; Zabalza I.; Aranda A.; Llera E.; Díaz S. (2011) Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy* 36, 1900e1907

Ortiz-Rodríguez, O; Castells F.; Sonnemann G. (2010) Life cycle assessment of two dwellings: One in Spain, a developed country, and one in Colombia, a country under development. *Science of the Total Environment* 408 2435–2443

Oyarzo J, Peuportier B. (2014) Life cycle assessment model applied to housing in Chile. *Journal of Cleaner Production* 69, 109e116

Fullana P.; Puig R. (1997) Análisis del Ciclo de Vida. Barcelona: Rubes.

PRESCO Project. [http://relay.iclei-europe.org/fileadmin/user\\_upload/relay/uploads/Kornadt.pdf](http://relay.iclei-europe.org/fileadmin/user_upload/relay/uploads/Kornadt.pdf) (02-06-2015)



Reed R., Bilos A., Wilkinson S., And Schulte K. (2009) International Comparison of Sustainable Rating Tools, viewed, 2 Septiembre 2012, <http://www.costar.com/josre/journalPdfs/01-Sustainable-Rating-Tools.pdf>

REGENER Project. [http://www-cep.ensmp.fr/francais/themes/cycle/pdf/cib\\_regener.pdf](http://www-cep.ensmp.fr/francais/themes/cycle/pdf/cib_regener.pdf) (02-06-2015)

Reijnders, L. & Roedel, A. V. (1999) Comprehensiveness and adequacy of tools for the environmental improvement of buildings. *Journal of Cleaner Production* 7 pp 221–225

Rossi B. ; Marique A. F.; Glaumann M. ; Reiter S. (2012) Life-cycle assessment of residential buildings in three different European locations, basic tool *Building and Environment* 51, 395e401

Sev, A. (2011) A comparative analysis of building environmental assessment tools and suggestions for regional adaptations, *Civil Engineering and Environmental Systems*, 28(3), 231-245

Sharma A.; Saxena A.; Sethi M.; Shree V, Varun. (2011) Life cycle assessment of buildings: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 871–875

Viola J.(2012) Derivation Of Reliable Simplification Strategies For The Comparative Lca Of Individual And “Typical” Newly Built Swiss Apartment Buildings. PhD Thesis. ETH ZURICH.

Wallhagen, M., Glaumann, M., Malmqvist. T. (2011) Basic building life cycle calculations to decrease contribution to climate change e Case study on an office building in Sweden. *Building and Environment* 46 1863e1871

Zabalza I.; Bribian, A.; Aranda U., Scarpellini S.(2009) Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. *Building and Environment* 44 (2009) 2510–2520

## Comunicación II

---

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez.  
*Propuesta metodológica simplificada para la aplicación del análisis de ciclo de vida (ACV) en  
tipologías de viviendas unifamiliares*  
Libro de Comunicaciones Científicas de Greencities (2016). Málaga

# PROPUESTA METODOLÓGICA SIMPLIFICADA PARA LA APLICACIÓN DEL ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA (ACV) EN TIPOLOGÍAS DE VIVIENDAS UNIFAMILIARES

Bernardette Soust-Verdaguer, Carmen Llatas, Antonio García-Martínez

*Universidad de Sevilla*

## Resumen

El sector de la edificación constituye uno de los que mayores impactos generan en relación a las emisiones de CO<sub>2</sub> y el consumo de recursos. Al tiempo que el sector residencial y en particular, la tipología de vivienda unifamiliar supone en su conjunto la que más emisiones de CO<sub>2</sub> genera. En ese sentido se hace necesaria cada vez más la utilización de nuevas herramientas que contribuyan al desarrollo de edificios que generen menos impacto en el medio ambiente desde fases iniciales del diseño. Por otra parte, la metodología de Análisis de Ciclo de Vida, es reconocida como la más completa, al tiempo que aún encierra prejuicios sobre su complejidad y esfuerzo en la recopilación de datos. La literatura de referencia reconoce caminos hacia su simplificación, mediante entre otros la integración del BIM (Building Information Modeling) como formato de entrada de información para la aplicación de la metodología. El objetivo de esta comunicación es el desarrollo de una propuesta metodológica para llevar adelante la evaluación ambiental de viviendas unifamiliares basada en el Análisis de Ciclo de Vida (ACV), incorporando simplificaciones al procedimiento. Los resultados confirman la viabilidad del desarrollo de la metodología para que pueda ser aplicada por técnicos de la edificación, durante las fases de diseño y proyecto. Se finaliza con un conjunto de conclusiones y recomendaciones sobre la metodología desarrollada.

Keywords: Análisis de Ciclo de Vida; Building Information Modeling (BIM); ACV simplificado; Evaluación ambiental de edificios; vivienda unifamiliar.

Área temática: Ciclo de vida de la ciudad y sus construcciones.

## Abstract

*The building sector is one of the most natural resources consumer and CO<sub>2</sub> emissions. Therefore, residential sector particularly single-family houses, is globally recognized as the residential typology responsible of the major CO<sub>2</sub> emissions. That fact evidence the need of using new tools which can help to reduce building environmental impacts since early stages of design. Life Cycle Assessment is globally recognized as the most complete for buildings environmental impacts calculation. While, several prejudice about complexity and time-consuming in data acquisition are still recognized. Reference literature underlines path toward it simplification, though among others the integration of BIM, as a data input format and feedback on the LCA application. The objective of this paper is to develop a methodology for the environmental assessment of single-family houses based on Life Cycle Assessment (LCA). Results confirm that the developed methodology can be used by building technicians and architects during design and project phases. Finally, new challenges and recommendations about the developed methodology are presented.*

## 1. Introducción

El sector de la construcción representa uno de los mayores consumidores de recursos a nivel mundial. Se estima que esto supone el consumo del 32% de los recursos entre los cuales se incluye el 12% del agua y el 40% de la energía (Yeheyis, Hewage, Alam, Eskicioglu, & Sadiq, 2012). En España por ejemplo la producción de residuos de la construcción supone un 28% de la producción total de residuos (Ministerio de Agricultura Alimentación Medioambiente de España, 2013).

Por otra parte, el sector de la edificación en especial la tipología de vivienda unifamiliar, constituye en el ámbito europeo, uno de los mayores responsable de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Petersdorff et al. (2006) demuestra que esta tipología es responsable del alrededor del 60% de las emisiones totales del sector residencial. Esto evidencia el enorme potencial que este sector encierra este hacia la mitigación de emisiones de CO<sub>2</sub> a escala regional y global.

Esto hace necesario que se avance hacia la minimización de estos impactos. En este sentido el uso de nuevas herramientas y métodos para mejorar el desempeño medio ambiental de los edificios ha venido creciendo en los últimos años.

El uso de herramientas de Análisis de Ciclo de Vida para la determinación de los impactos ambientales se está extendiendo cada vez más hasta este sector, como estrategia de diseño de viviendas nuevas y evaluación del stock existente. Soust-Verdaguer et al. (2016) demuestra el creciente uso de esta metodología para evaluar los impactos ambientales que produce la tipología de vivienda unifamiliar.

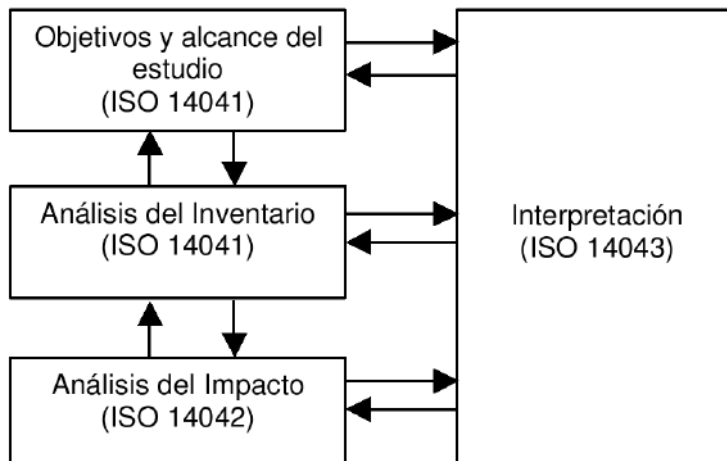
Por otra parte, diversas fuentes bibliográficas reconocen la existencia de dificultades en la aplicación de esta metodología al sector de la edificación (Kellenberger & Althaus, 2009; Lasvaux, Schiopu, Chevalier, & Peuportier, 2012; Malmqvist et al., 2011; Soust-Verdaguer et al., 2016), y plantean la necesidad de simplificar y optimizar la aplicación. Ajayi, et al. (2015) reconoce que uno de los mayores problemas radica en el tiempo que se invierte en recopilar la información y desarrollar la entrada manual de los datos del edificio para desarrollar el cálculo de los impactos. A los efectos de simplificar y optimizar este procedimiento, se plantea como solución a este problema la integración de herramientas BIM (Building Information Modeling) al proceso de aplicación del ACV.

Diversas fuentes bibliográficas reconocen las potencialidades que encierra la integración de ambas herramientas. Machado et al. (2015) reconoce las oportunidades de desarrollo durante las etapas de proyecto y planificación de construcciones sostenibles. Pierucci et al. (2015) propone una metodología que integra BIM y ACV para evaluar diferentes tipos de paneles utilizados como cerramientos verticales en edificios.

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de una propuesta metodológica que permita aplicar de forma simplificada la metodología de Análisis de Ciclo de Vida en viviendas unifamiliares, integrando a dicho proceso la utilización de herramientas BIM.

## 1.1 Análisis de ciclo de vida

La metodología de Análisis de Ciclo de Vida constituye una de las más aplicadas hacia la cuantificación de los impactos ambientales (Oyarzo & Peuportier, 2014). Su aplicación está regulada por la serie de normas ISO 14040 (ISO, 2006a). El método se basa en contabilizar las entradas y las salidas a un sistema definido, para luego determinar su impacto en el medioambiente (ISO, 2006a).



*Fig. 1 Esquema de organización de las fases del método ACV, basado en ISO 14040.*

Por otra parte de acuerdo a lo establecido en las normas ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006a, 2006b) la metodología se compone de 4 fases. Estas fases tienen por objetivo la definición de los límites del sistema, el análisis y cuantificación de los elementos y procesos que componen el objeto de estudio, el análisis de los impactos de elementos y procesos obtenidos en la fase anterior y la interpretación de los datos obtenidos.

## 1.2 Análisis de ciclo de vida de edificios

El método de ACV ha venido utilizándose como instrumento para cualificar los impactos que produce el sector de la edificación. Diversos estudios demuestran su creciente aplicación en el sector tanto a escala edilicia como urbana (Buyle, Braet, & Audenaert, 2013; Cabeza, Rincón, Vilariño, Pérez, & Castell, 2014; Lotteau, Loubet, Pousse, Dufrasnes, & Sonnemann, 2015; Soust-Verdaguer et al., 2016).

A nivel europeo su aplicación en edificios está regulado por la norma EN 15978 (EN 15978, 2011), en la que se establecen las principales directrices para su aplicación en este sector. En ella se describen las 4 principales etapas a tener en cuenta (producto, construcción, uso y demolición) y módulos de información que componen a cada una de ellas.

De acuerdo a la norma EN 15978 (EN 15978, 2011) los resultados de la aplicación del ACV se expresan a través de indicadores ambientales agrupados en: indicadores que describen impactos ambientales, indicadores que describen el uso de recursos,

indicadores que describen categorías de residuos, indicadores que describen flujos de salida que abandonan el sistema (ej. Componentes para reutilización, energía exportada, etc.).

Por otra parte, el EeBGuide Handbook (EeB Guide Project, 2012) asume que la aplicación de la metodología de ACV en el sector de la edificación no se puede realizar con el mismo grado de detalles y exhaustividad que se realiza en otros sectores.

En este sentido, la literatura de referencia destaca ciertos puntos importantes en los que se podría trabajar para simplificar y optimizar la aplicación del ACV en edificios. Malmqvist et al. (2011) por ejemplo, enumera los siguientes aspectos de cara la simplificación de la aplicación de la metodología ACV en edificios:

- reducir la cantidad de datos durante la fase de cuantificación de materiales y proceso y enfocarse en los más relevantes,
- simplificar la fase de análisis de inventario enfocándose en las cuestiones más importantes,
- simplificar la fase de análisis de impactos, reduciendo el número de indicadores considerados,
- reducir el tiempo en la aplicación de la metodología y (fase de entrada de datos) mediante el uso de herramientas informáticas tipo CAD.

Por otra parte, Soust-Verdaguer et al., (2016) señala que las principales estrategias de simplificación identificadas en la aplicación de ACV en viviendas unifamiliares son las siguientes: la optimización de la recolección de los datos, la simplificación de los elementos que componen la unidad funcional, la limitación del estudio a las fases más relevantes, la elección de aquellos escenarios que requieran menor cantidad de esfuerzo en recolección de datos, el uso de bases de datos genéricas, el uso de métodos de cálculo simplificados, y la reducción del número de indicadores de impacto ambiental considerados.

Esto genera condiciones para avanzar en el desarrollo de estrategias que tiendan a ampliar el uso del ACV dentro del sector residencial e integrarlo con nuevas herramientas de diseño (BIM), con el objetivo de controlar y reducir los impactos que este sector genera.

### **1.3 Herramientas BIM y diseño sostenible**

Building Information Modelling (BIM) es una reconocida herramienta capaz de integrar información gráfica como características de los materiales y elementos que conforman el edificio (Kota, Haberl, Clayton, & Yan, 2014). Representa una nueva generación de las herramientas CAD (Caldas, Nascimento, Carvalho, & Sposto, 2015), y es concebida para facilitar y optimizar la gestión de la información sobre el edificio desde las fases de concepción. Diversos autores evidencian las potencialidades que encierra el uso de herramientas BIM hacia la reducción de los impactos medio ambientales que producen los edificios (Ajayi et al., 2015; Akbarnezhad, Ong, Chandra, & Lin, 2012; Umar et al., 2016; Yeheyis et al., 2012).

Por otra parte, la Directiva Europea 2014/24/EU (Official Journal of the European Union, 2014) hace obligatorio el uso de herramientas BIM para edificios públicos a partir del año 2018. En algunos países europeos su uso ya comienza a afianzarse como estrategia para mejorar el desempeño medioambiental de los edificios y reducir sus impactos medioambientales desde las primeras fases de diseño. En este sentido, el gobierno del Reino Unido a partir de este año ha hecho obligatorio su uso para la construcción de edificios públicos, independientemente de su escala (HM Government, 2015).

El grado de desarrollo de la información que contiene el modelo BIM se denomina nivel de detalle o “nivel de desarrollo”, y está definido de acuerdo a la cantidad de información que contiene el modelo (Volk, Stengel, & Schultmann, 2014). El American Institute of Architecture (AIA), reconoce 5 niveles de desarrollo para el modelado de edificios en BIM (LOD en inglés): LOD 100, LOD 200, LOD 300, LOD 400 y LOD 500 (AIA, 2013). Esta clasificación parte de los modelos menos desarrollados en cuanto a contenido y modelado de objetos, hasta llegar a un mayor nivel de detalle.

#### **1.4 Integración BIM-ACV**

Las potencialidades de la integración de herramientas BIM a la aplicación de ACV de edificios se demuestran en diversos trabajos (Ajayi et al., 2015; Basbagill, Flager, Lepech, & Fischer, 2013; Gantner, Schneider, Fischer, Lozanovski, & Gehring, 2014; Jalaei & Jrade, 2014; Jrade & Jalaei, 2013; Kreiner, Passer, & Wallbaum, 2015; Lee, Tae, Roh, & Kim, 2015; Soust-Verdaguer et al., 2016). Kreiner et al. (2015), desarrolla una metodología para la evaluación ambiental basada en el ACV, donde reconoce que la integración de BIM y ACV es una forma de mejorar el desempeño ambiental de los edificios.

Por otra parte, la literatura de referencia demuestra que el uso más frecuente del BIM en la aplicación del ACV, se verifica en las fases de cuantificación de los materiales. Houlihan Wiberg et al. (2014) reconoce que el uso del BIM en la aplicación del ACV, permite visualizar las entradas de materiales y ayuda a la identificación de posibles errores.

No obstante, los desafíos metodológicos que presenta la integración de ambas herramientas (BIM-ACV) aún siguen siendo importantes (Antón Álvarez & Díaz, 2014; Rist, 2011), sobre todo hacia realizar de forma más eficiente el intercambio de datos y generar una interfaz amigable con el usuario (Rist, 2011). Esto genera condiciones para el desarrollo de pautas metodológicas que aporten en este sentido, enfocadas en tipologías de viviendas unifamiliares, responsable de las mayores emisiones de CO<sub>2</sub> que produce el sector residencial.



## 2. Propuesta metodológica

La metodología desarrollada retoma aspectos abordados en los antecedentes identificados, con el objetivo de enriquecer, optimizar y simplificar su aplicación del ACV en viviendas unifamiliares.

El procedimiento de cálculo incluye las principales fases que componen el ciclo de vida de la vivienda. De acuerdo a lo establecido en la norma EN 15978, el sistema considerado se limita a las fases de manufactura de los materiales, la fase de ensamblaje y construcción, la fase de uso y mantenimiento y la fase de fin del ciclo de vida.

Se parte del modelo BIM de la tipología, cuyo grado de detalle de acuerdo a la clasificación del AIA será del LOD 200. Esto posibilita la aplicación de la metodología a las primeras fases de diseño de la tipología, sin necesidad de alcanzar durante la fase de modelado y definición del modelo, un alto grado de detalle en los elementos constructivos que componen el edificio.

La propuesta metodológica se centra en optimizar y simplificar aspectos referidos a la estructura de datos sobre cantidades y tipos de materiales aportado por el modelo BIM, aspectos referidos a la información sobre procesos aportados por datos estadísticos o bases de datos y aspectos referidos a datos medioambientales aportados por bases de datos. De modo que la fase de incorporación del BIM se centra principalmente en la elaboración del análisis de inventario (cuantificación de los materiales y de sus impactos).

Teniendo en cuenta los siguientes trabajos (Galan-Marin, Rivera-Gomez, & Garcia-Martinez, 2016; Gantner et al., 2014) y la norma (EN 15978, 2011) la **Tabla 1** detalla el tipo de información requerida sobre el edificio y las posibles fuentes de datos.

**Tabla 1: Esquema de la información del edificio que se incluirá en la aplicación del ACV.**

Fases del ciclo de vida	Tipo de información necesaria sobre el edificio durante la aplicación del ACV	Fuente de información
Producto	Suministro de materias primas	Base de datos genérica (ej. ECOINVENT)
	Transporte	
	Manufactura de materiales	
Construcción	Tipo y cantidad de material	Modelo BIM
	Distancia recorrida al sitio de construcción	Datos estadísticos o información sobre fabricantes
Uso	Escenario de mantenimiento de los materiales	Datos estadísticos sobre mantenimiento de materiales
	Escenario de consumo energético del edificio	Datos estadísticos locales sobre consumo (ej. SPAHOUSEC (IDAE, 2011))
	Fuente de recurso energético	Datos estadísticos locales sobre consumo (ej. SPAHOUSEC (IDAE, 2011))
Demolición	Escenario para el fin del ciclo de vida de los materiales	Vertedero*
	Transporte vinculado al final de ciclo de vida	Distancia recorrida a vertedero más próximo

\*Escenario asumido

Por otra parte, la metodología desarrollada asume la existencia de 2 sistema referidos a la fase de uso, el primero asume al edificio como un objeto y se focaliza en determinar los impactos producidos por la tipología en esta fase, la cual depende del desgaste natural de los materiales. El segundo reconoce al edificio como un objeto en el que se desarrolla una determinada actividad (vivienda) en el cual se crea un escenario de utilización en función de los hábitos de los usuarios, el contexto en el que se emplace el edificio, y otras cualidades externas al objeto edificio.

Se asume la deposición en vertedero de los residuos como escenario de fin del ciclo de vida del edificio, a los efectos de reducir la cantidad de datos considerados sobre el edificio durante esa fase.

El procedimiento de cálculo para realizar el análisis de inventario se basa en (García-Martínez, 2010), y parte de la identificación y cuantificación de los productos; la identificación y cuantificación de los procesos de construcción y demolición; la obtención de datos sobre el escenario de consumo energético de la vivienda; la

obtención de las entradas y las salidas al sistema; la elaboración del análisis de inventario y cálculo de los impactos.

El cruzamiento de los datos obtenidos se realiza a través de una hoja de cálculo en la que se vinculan los datos referidos a la vivienda, los datos provenientes de bases de datos y otras fuentes bibliográficas en las que se basa la metodología.

Los resultados obtenidos se expresan de acuerdo a los indicadores que describen impactos ambientales según la norma (EN 15978, 2011), reduciéndose el número de indicadores, para simplificar el proceso de cálculo y la fase de análisis de inventario. En ese sentido se utilizarán 2 criterios para definir los indicadores: aquellos que se utilicen con mayor frecuencia y aquellos que tiene mayor incidencia en el contexto considerado. De acuerdo a Soust-Verdaguer et al. (2016) el indicador que más frecuentemente se utilizan en la aplicación del ACV de esta tipología es el GWP (Global Warming Potential).

### **3. Resultados y discusión**

La metodología propuesta se basa en optimizar la entrada de datos sobre la vivienda y propone la utilización de la estructura de datos desde la que parte del modelo BIM de la misma. De modo que es posible definir un modelo físico con un grado de detalle conocido (LOD 300) al cual se aplica la metodología ACV. En este caso la cantidad de información sobre la vivienda y su grado de desarrollo o detalle siempre será el mismo, lo que genera mayores garantías hacia la comparabilidad de los resultados.

Por otra parte, la metodología propuesta propone la reducción del número de indicadores, considerando los más frecuentes para la tipología de estudio y los que tienen mayor relevancia en el contexto. Esta estrategia de reducción de indicadores también se verifica en Hanandeh, (2015) para el cálculo de impactos basados en ACV de la tipología de vivienda unifamiliar.

Los principales avances de la unificación de ambas herramientas radican en la gestión de los datos de entrada, la reducción de esfuerzos para el cruzamiento y vinculación de los datos, así como también la simplificación de los procedimientos de obtención de resultados.

### **4. Conclusiones**

El presente trabajo evidencia las potencialidades que presenta la metodología propuesta como estrategia para simplificar la cuantificación y el cálculo de los impactos ambientales que producen las viviendas unifamiliares integrando las herramientas BIM y ACV.

La metodología propuesta demuestra simplificar y optimizar el procedimiento de aplicación del ACV, así como también avanzar en el uso del BIM para mejorar el desempeño ambiental de los edificios. Su aplicación puede llevarse adelante en las primeras fases de diseño y proyecto dado que no es necesario un grado de definición

avanzado del edificio. Al mismo tiempo se comprueba que la aplicación no depende de procedimientos complejos que requieran un grado de especificidad determinado, haciendo posibles su aplicación por parte de técnicos del sector de la edificación.

## 5. Referencias

- AIA, A. I. of A. (2013). *Guide, Instructions and Commentary to the 2013 AIA Digital Practice Documents*.
- Ajayi, S. O., Oyedele, L. O., Ceranic, B., Gallanagh, M., & Kadiri, K. O. (2015). Life cycle environmental performance of material specification: a BIM-enhanced comparative assessment. *International Journal of Sustainable Building Technology and Urban Development*, 6(1), 14–24. <http://doi.org/10.1080/2093761X.2015.1006708>
- Akbarnezhad, A., Ong, K. C. G., Chandra, L. R., & Lin, Z. (2012). Economic and Environmental Assessment of Deconstruction Strategies Using Building Information Modeling. *Construction Research Congress*, 1730–1739. <http://doi.org/10.1061/9780784412329.174>
- Antón Álvarez, L., & Díaz, J. (2014). Integration of life cycle assessment in a BIM environment. *Procedia Engineering*, 85, 26–32. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.525>
- Basbagill, J., Flager, F., Lepech, M., & Fischer, M. (2013). Application of life-cycle assessment to early stage building design for reduced embodied environmental impacts. *Building and Environment*, 60, 81–92. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.11.009>
- Buyle, M., Braet, J., & Audenaert, A. (2013). Life cycle assessment in the construction sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 379–388. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.001>
- Cabeza, L. F., Rincón, L., Vilariño, V., Pérez, G., & Castell, A. (2014). Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 394–416. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- Caldas, L. R., Nascimento, M. L. M., Carvalho, M. T. M., & Sposto, R. M. (2015). DIAGNÓSTICO DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA RELACIONADA À APLICAÇÃO DO BIM À METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV). In *CILAMCE*. Rio de Janeiro.
- EeB Guide Project. (2012). Operational Guidance for Life Cycle Assessment Studies of the Energy Efficient Buildings Initiative. Retrieved from <http://www.eebguide.eu/>
- EN 15978. (2011). BS EN 15978:2011 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method. *International Standard*, (November).
- Galan-Marin, C., Rivera-Gomez, C., & Garcia-Martinez, A. (2016). Use of Natural-Fiber Bio-Composites in Construction versus Traditional Solutions: Operational and Embodied Energy Assessment. *Materials*, 9(6), 465. <http://doi.org/10.3390/ma9060465>
- Gantner, J., Schneider, S., Fischer, M., Lozanovski, A., & Gehring, F. (2014). BIM as a data source for LCA and building certification schemes Certification schemes and BIM as a possible solution German research project BIMiD. In *New Zeland Life Cycle Assessment conference* (pp. 116–119).
- García-Martínez, A. (2010). *Life Cycle Assessment (LCA) for the development of Environmental Declarations of Dwellings in Andalusia*. Retrieved from <http://fondosdigitales.us.es/tesis/tesis/1546/analisis-del-ciclo-de-vida-acv-de-edificios-propuesta-metodologica-para-la-elaboracion-de-declaraciones-ambientales-de-viviendas-en-andalucia-life-cycle-assessment-lca-development-environmental-declarations-dw>
- Hanandeh, A. El. (2015). Environmental assessment of popular single-family house construction alternatives in Jordan. *Building and Environment*, 92, 192–199. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.032>
- HM Government. (2015). *Construction 2025*.
- Houlihan Wiberg, A., Georges, L., Dokka, T. H., Haase, M., Time, B., Lien, A. G., ... Maltha, M. (2014). A net zero emission concept analysis of a single-family house. *Energy and Buildings*, 74, 101–110. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.01.037>
- IDAE Secretaría General Departamento de Planificación y Estudios. (2011). *SPAHOUSEC PROJECT Análisis del Consumo Energético del Sector Residencial en España INFORME*

- FINAL. Madrid. Retrieved from [http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_informe\\_spahousec\\_acc\\_f68291a3.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_informe_spahousec_acc_f68291a3.pdf)
- ISO. (2006a). ISO 14040: Environmental management — Life Cycle Assessment — Principles and Framework. *Environmental Management*, 3, 28. <http://doi.org/10.1002/jtr>
- ISO. (2006b). ISO 14044:2006. ISO. Retrieved from <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:14044:ed-1:v1:en>
- Jalaei, F., & Jrade, A. (2014). An Automated BIM Model to Conceptually Design , Analyze , Simulate , and Assess Sustainable Building Projects. *Hindawi, 2014*(Journal of Construction Engineering), 1–21. <http://doi.org/10.1155/2014/672896>
- Jrade, A., & Jalaei, F. (2013). Integrating building information modelling with sustainability to design building projects at the conceptual stage. *Building Simulation*, 6(4), 429–444. <http://doi.org/10.1007/s12273-013-0120-0>
- Kellenberger, D., & Althaus, H. J. (2009). Relevance of simplifications in LCA of building components. *Building and Environment*, 44(4), 818–825. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.06.002>
- Kota, S., Haberl, J. S., Clayton, M. J., & Yan, W. (2014). Building Information Modeling (BIM)-based daylighting simulation and analysis. *Energy and Buildings*, 81, 391–403. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.043>
- Kreiner, H., Passer, A., & Wallbaum, H. (2015). A new systemic approach to improve the sustainability performance of office buildings in the early design stage. *Energy and Buildings*, 109, 385–396. <http://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.040>
- Lasvaux, S., Schiopu, N., Chevalier, J., & Peuportier, B. (2012). Relevance of a French simplified life cycle inventory database using building products industry data. In *International Symposium of life cycle assessment and construction*. (pp. 46–54). Nantes, France.
- Lee, S., Tae, S., Roh, S., & Kim, T. (2015). Green Template for Life Cycle Assessment of Buildings Based on Building Information Modeling: Focus on Embodied Environmental Impact. *Sustainability*, 7, 16498–16512. <http://doi.org/doi:10.3390/su71215830>
- Lotteau, M., Loubet, P., Pousse, M., Dufrasnes, E., & Sonnemann, G. (2015). Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale. *Building and Environment*, 93, 165–178. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.029>
- MACHADO, F. A., SIMÕES, C. C., & MOREIRA, L. C. de S. (2015). POTENCIALIDADES DA INTEGRAÇÃO DO BIM AO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DAS EDIFICAÇÕES. In *SIBRAGEC - ELAGEC 2015. SÃO CARLOS – SÃO PAULO*.
- Malmqvist, T., Glaumann, M., Scarpellini, S., Zabalza, I., Aranda, A., Llera, E., & D??az, S. (2011). Life cycle assessment in buildings: The ENSLIC simplified method and guidelines. *Energy*, 36(4), 1900–1907. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2010.03.026>
- Ministerio de Agricultura Alimentación Medioambiente de España. (2013). PROGRAMA ESTATAL DE PREVENCIÓN DE RESIDUOS. Retrieved from [http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/Programa\\_de\\_prevenccion\\_aprobado\\_actualizado\\_ANFABRA\\_11\\_02\\_2014\\_tc\\_m7-310254.pdf](http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/planes-y-estrategias/Programa_de_prevenccion_aprobado_actualizado_ANFABRA_11_02_2014_tc_m7-310254.pdf)
- Official Journal of the European Union. (2014). *DIRECTIVE 2014/24/EU*. Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0024&from=es>
- Oyarzo, J., & Peuportier, B. (2014). Life cycle assessment model applied to housing in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 69, 109–116. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.090>
- Petersdorff, C., Boermans, T., & Harnisch, J. (2006). Mitigation of CO2 emissions from the EU-15 building stock: beyond the EU Directive on the Energy Performance of Buildings. *Environmental Science and Pollution Research International*, 13(5), 350–358. <http://doi.org/10.1007/BF03039568>
- Pierucci, A., Dell'Osso, G. . ., & Cavalliere, C. (2015). Building information flow management through LCA evaluations. In *ISTeA 2015, At Milano, Volume: Environmental Sustainability, Circular Economy and Building Production*.
- Rist, T. (2011). *A path to BIM-based LCA for whole-buildings*. Ntnu.Edu. Retrieved from <http://www.ntnu.edu/documents/139834/7683624/p072.pdf>
- Soust-Verdaguer, B., Llatas, C., & García-Martínez, A. (2016). Simplification in life cycle assessment of single-family houses: a review of recent developments. *Building and Environment*, 103. <http://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.04.014>
- Umar, U. A., Shafiq, N., Amirhossein, M., Nuruddin, M. F., Syed, A. F., & Salihi, I. U. (2016).

- Application of Structural Building Information Modeling (S-BIM) for Sustainable Buildings Design and Waste Reduction: A Review. *International Journal of Applied Engineering Research*, Volume 11(Number 2), 1523–1532. Retrieved from [http://www.ripublication.com/ijaer16/ijaerv11n2\\_132.pdf](http://www.ripublication.com/ijaer16/ijaerv11n2_132.pdf)
- Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - Literature review and future needs. *Automation in Construction*. <http://doi.org/10.1016/j.autcon.2013.10.023>
- Yeheyis, M., Hewage, K., Alam, M. S., Eskicioglu, C., & Sadiq, R. (2012). An overview of construction and demolition waste management in Canada: a lifecycle analysis approach to sustainability. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 81–91. <http://doi.org/10.1007/s10098-012-0481-6>